

(19) Japan Patent Office (JP)

(12) Bulletin of Laid-Open Patent (A)

(11) Patent Application Laid-Open No.
Laid-Open Patent H9-21620

(43) Announcement Date January 21, Heisei 9 (1997)

(51) Int.Cl. ⁷	Identification No.	Patent Office Filing No.	FI	Technological Label
G01B	11/24		G01B 11/24	C
G06T	7/00		G06F 15/62	415
	1/00			M

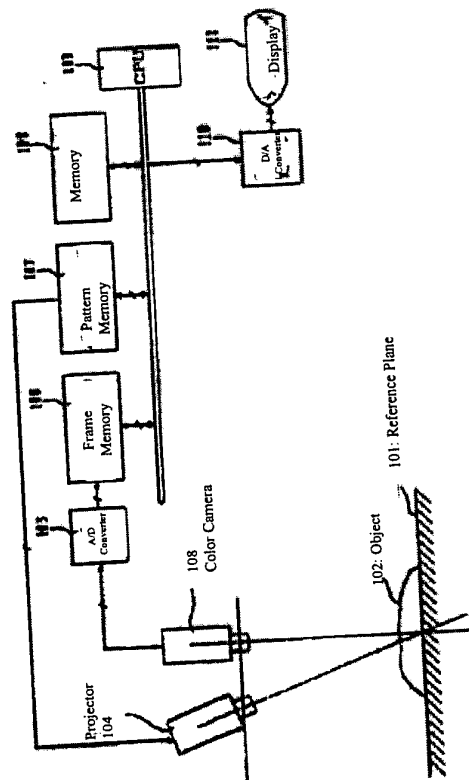
(21) Application No.	Patent Application H7-192452	Request for Review	Unclaimed	No. of Claims 14	FD (Total 18 Pages)
(22) Application Date	July 5, Heisei 7 (1995)	(71) Applicant	000237156 Fuji FACOM Control Co., Ltd. 1 Fuji-Cho, Hino-Shi, Tokyo City		
		(72) Applicant	000005234 Fuji Electric Co., Ltd. 1-1 Tanabeshinden, Kawasaki-Ku, Kawasaki-Shi, Kannagawa-Ken		
		(72) Inventor	Katsumi Hosokawa Fuji FACOM Control Co., Ltd. 1 Fuji-Cho, Hino-Shi, Tokyo City		
		(74) Representative	Yuichi Morita, Attorney		

(54) [Name of Invention] Methods for measuring the three-dimensional form of an object

(57) [Abstract]

[Problem(s)] It is not possible to accurately measure the three-dimensional form of an object due to shape changes and irregularities in object surfaces, surface variations, patterns, dirt, the size of the object, or the compositional material. As a result, a long time is required for processing.

[Means to Solve Problem(s)] A method applicable to three-dimensional form measurement devices equipped with a color camera for taking pictures of objects 103, an A/D converter 105, frame memory 106, a projector 104 for projecting pattern light with arbitrary color and intensity onto an object 102, pattern memory 107 that stores the projected pattern data, memory 108, a D/A converter 110, display 111 and CPU 109. Create pattern data by composing multiple sinusoid slit pattern data that has different frequency elements and color elements. The transformed lattice images obtained by projecting pattern light based on this data onto an object 102 are separated by color elements, and then by calculating the form of the object 102 from the per-color element transformed lattice images, a final three-dimensional form is assumed from the compositing of the calculation results.



BEST AVAILABLE COPY

[Scope of Claims]

[Claim 1] Methods for measuring the three-dimensional form of an object characterized by: creating pattern data by composing multiple sinusoid slit pattern data that has different frequency elements and color elements with a three-dimensional form measurement device for objects equipped with a color camera for taking pictures of the surface form of objects, an A/D converter that converts analog image data output from this camera into digital image data, frame memory that stores the digital image data output from the A/D converter, a projector for projecting pattern light onto an object that has arbitrary color and intensity by being configured in different directions from the color camera, pattern memory that stores the pattern data of the pattern light projected by the projector, memory as a work area, a D/A converter that converts digital image data into analog image data, a display that shows analog image data output from the D/A converter and a CPU that controls everything and performs calculations; separates the transformed lattice images obtained by projecting pattern light based on this pattern data onto an object by color elements and then calculates the form of the object from the per-color element transformed lattice image; and assumes a final three-dimensional form for the object from the compositing of these calculation results.

[Claim 2] Methods for measuring the three-dimensional form of objects characterized by: creating pattern data by composing multiple sinusoid slit pattern data that has the same frequency elements with different color elements by off-setting the phase per fixed amounts with a three-dimensional form measurement device for objects equipped with a color camera for taking pictures of the surface form of objects, an A/D converter that converts analog image data output from this camera into digital image data, frame memory that stores the digital image data output from the A/D converter, a projector for projecting pattern light onto an object that has arbitrary color and intensity by being configured in different directions from the color camera, pattern memory that stores the pattern data of the pattern light projected by the projector, memory as a work area, a D/A converter that converts digital image data into analog image data, a display that shows analog image data output from the D/A converter and a CPU that controls everything and performs calculations; separates the transformed lattice images obtained by projecting pattern light based on this pattern data onto an object per color elements and then calculates the three-dimensional form of an object by calculating the amount of phase modulation from between the per-color element transformed lattice images.

[Claim 3] Methods for measuring the three-dimensional forms of objects, using the three-dimensional form measurement methods in Claim 1 or Claim 2, characterized by: radially configuring multiple color cameras against an object to take pictures of the object from multiple directions and then calculating the three-dimensional form of the object by composing form data measured based on images observed by each camera.

[Claim 4] Methods for measuring the three-dimensional form of objects, using the three-dimensional form measurement methods in Claim 1 or Claim 2, characterized by: juxtaposing multiple color cameras against an object so that they divide the flat measurement range of an object,

and then calculating the three-dimensional form of an object by composing form data measured based on images observed by each camera.

[Claim 5] Methods for measuring the three-dimensional forms of objects, using the three-dimensional form measurement methods in Claim 1 or Claim 2, characterized by: radially configuring multiple projectors against an object to project pattern light from multiple directions onto the object, and then calculating the three-dimensional form of the object from form data measured based on images observed by camera via pattern light from each projector.

[Claim 6] Methods for measuring the three-dimensional form of objects, using the three-dimensional form measurement methods in Claims 1, 2, 3 or 4, characterized by: juxtaposing multiple projectors against an object so that they divide the flat projection range of the pattern light against the object, and then calculating the three-dimensional form of the object from form data measured based on images observed by camera via pattern light from each projector.

[Claim 7] Methods for measuring the three-dimensional form of objects, using the three-dimensional form measurement methods in Claim 5 or Claim 6, characterized by: detecting shadow sections generated by surface variations between the reference plane in which the object is placed and the object itself by projecting white and solid-color pattern light onto the object from multiple projectors, and then detecting the contour positions and height of the object by the shadow sections, based on the projection angle of the pattern light, and then calculating the form of the object by projecting pattern light based on slit pattern data, with only the areas determined to be where the object exists based on the contour position information as the subject, and then correct the calculated form to an absolute value based on the aforementioned contour position and height.

[Claim 8] Methods for measuring the three-dimensional form of objects, using the three-dimensional form measurement methods in Claim 5 or Claim 6, characterized by: detecting shadow sections generated by surface variations in the top of an object surface by projecting white and solid-color pattern light onto the object from multiple projectors, and then together with detecting the edge positions of the surface variations from this shadow information, detecting the height at the edge positions of the surface variations from the projection angle of the pattern light, and then detecting the highs and lows on both sides of the edge positions from the projecting direction of the pattern light that generates the shadow sections, and then correcting the calculation results for the three-dimensional form of the object using these detection values.

[Claim 9] Methods for measuring the three-dimensional form of objects, using the three-dimensional form measurement method in Claim 8, characterized by making multiple divisions of the planer shape of the object per areas that have the same height, based on the surface variations in the edge positions on the object surface and the contour positions of the object, detecting the forms per area by adjusting the frequency elements of the pattern light per divided area, and then calculating an overall three-dimensional image of the object by composing these forms.

[Claim 10] Methods for measuring the three-dimensional form of objects, using the three-dimensional form measurement method in Claim 9, characterized by: using lenses that can electrically adjust the focus of camera and projector lenses, and, when performing form calculations per areas of the object divided by the areas that have the same height, adjusting the focus of the aforementioned lenses via an interface from a CPU, according to the average height of these areas.

[Claim 11] Methods for measuring the three-dimensional form of objects, using one item from Claims 5~10, characterized by: calculating the luminance difference of each pixel for images taken by camera of conditions in which pattern light is not projected from all projectors, and images taken by camera of conditions in which pattern light is projected by all projectors, determining if the form is irregular for areas in which this luminance difference is minute, and then measuring the three-dimensional form of objects from measurement data from areas other than these areas.

[Claim 12] Methods for measuring the three-dimensional form of objects, with three-dimensional form measurement methods in Claim 1, characterized by: using lenses that can electrically adjust the aperture of camera and projector lenses, adjusting the aperture of the lens via an interface from a CPU in order to increase the luminance for areas for which it is determined that the luminance difference is minute and the form is irregular due to the previous form measurement, recalculating the luminance difference under conditions in which the aperture has been adjusted, then dividing it into areas for which the luminance difference has changed and areas for which it has not changed due to aperture adjustments for areas for which it was determined that the form was irregular due to the previous form measurements, re-measuring the form by projecting pattern light at areas in which the luminance difference had changed, determining form irregularities in areas where the luminance difference had not changed, and then measuring the three-dimensional form of the object by compositing the previous form measurement results and the measurement results for the new re-measurements.

[Claim 13] Methods for measuring the three-dimensional form of objects, using one item from Claims 5~10, characterized by: extracting the areas where the luminance is saturated due to surface conditions of the object from images taken by camera of conditions in which pattern light is projected from all the projectors, determining if the form is irregular in these areas, and then measuring the three-dimensional form of the object from the measurement data for areas other than these areas,

[Claim 14] Methods for measuring the three-dimensional form of objects, with three-dimensional form measurement methods in Claim 13, characterized by: using lenses that can electrically adjust the aperture of camera and projector lenses, adjusting the aperture of the lens via an interface from a CPU in order to reduce luminance for areas for which the luminance is saturated and it is determined that the form is irregular due to the previous form measurement, re-extracting the luminance saturation area under conditions in which the aperture has been adjusted, then dividing it into areas for which the luminance has changed and areas for which it has re-saturated due to aperture

adjustments for areas for which it was determined that the form was irregular due to the previous form measurements, re-measuring the form by projecting pattern light at areas in which the luminance has changed, determining form irregularities in areas where the luminance has re-saturated, and then measuring the three-dimensional form of objects by compositing the previous form measurement results and the measurement results for the new re-measurements.

[Detailed Explanation of Invention]

[0001]

[Field of Technology] This invention takes pictures of transformed lattice images obtained by projecting pattern light from a projector with a color camera, and is related to methods for measuring the three-dimensional form of objects by making contactless measurements of the three-dimensional form of objects.

[0002]

[Prior Art] The standard method of measuring the form of an object by projecting pattern light onto it is the known method for contactless measurement of the three-dimensional forms of objects. The principle of this method is to project standard pattern light, such as coherent light from a grill slit light or laser light, for example, against an object. For these standard patterns, interference fringes from a laser light are used for small objects, while arbitrary patterns generated by projecting lattice patterns made on film by a light source such as a slide projector, or using a liquid crystal device instead of film, are used for large objects.

[0003] When objects that have standard patterns projected on them are observed by camera from a direction other than the direction from which the standard pattern was projected, transformed lattice images for which the pattern light changed due to the form of the object are observed. By analyzing this altered state of the lattice image, it is possible to obtain the original three-dimensional shape of the object.

[0004] Various methods are available for analyzing transformed lattice images. For example, as a first method, there is the stripe scanning or phase shift method of calculating the original form of an object by shifting the phase of projected patterns, and then calculating the phases of each pixel from among the transformed lattice images made by these shifted patterns (Komatsubara, Yoshizawa: "Lattice Pattern Projection with Introduction of Stripe Scanning," Precision Society Review, Vol. 55, No. 10, pp. 1817~1822 (1989)).

[0005] As a second method, there is the Fourier transform method for calculating the form of an object by transforming the transformed lattice images made by one of the projected patterns into frequency domains, and then extracting only the required frequency elements (M. Takeda, K. Mutoh: "Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3-D object shapes", applied Optics, Vol. 22, No. 24, pp. 3977~3982 (1983)).

[0006] As a third method, there is the scanning moiré method for calculating the form of an object from moiré images obtained with transformed lattice images observed by projecting patterns that match camera scanning lines, and using the camera scanning lines as a reference grid on the observation side. (Arai, Kurata: "High-speed and high-resolution moiré topography through techniques for stripe

scanning interferometry," Optical, Vol. 15, No. 5, pp. 402~406 (1986)).

[0007] Furthermore, as a fourth method, there is the phase-shift electron moiré method for calculating the form of an object by making moiré images by computer between the transformed lattice images made by one of the projected patterns and the reference patterns offset by two or more phases created in the computer, and then calculating the form from the phases between these moiré images. (Kato, Yamaguchi: "Real-time processing of striped images using phase-shift electron moiré," Sensor Technology, Vol. 12, No. 7, pp. 39~44 (1992)).

[0008] Irregardless of the method, intensity distribution $I(x, y)$ of the stripes obtained for each observed pixel are defined by Formula 1, and the phase information $\phi(x, y)$ is calculated for each point.

[0009]

[Formula 1] $I(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \cdot \cos(2\pi fx + \phi(x, y))$

[0010] Here, ϕ is information that is reflecting the form of an object, and if it is possible to obtain this ϕ , then it is possible to calculate the form. The phase information ϕ for each point is folded into the range of $-\pi \leq \phi < \pi$ (assumed to be $-\pi/2 \leq \phi < \pi/2$ according to method), and a discontinuous value is taken. This is connected by methods such as the so-called phase unwrapping method (refer to K. Itoh: Analysis of the phase unwrapping algorithm," Applied Optics, Vol. 21, No. 14, pp. 2470 (1982) and continuous phase distribution is obtained. Therefore, the phases are transformed into the three-dimensional form of an object in space, based upon the optical position of the camera or light source, as the final form.

[0011] These methods are applicable primarily to objects which do not have drastic changes in the form of their surfaces.

[0012]

[Problems to be Solved by Invention] As described above, the following problems exist for conventional techniques for measuring the three-dimensional form of objects by projecting pattern light.

(1) Because it is not possible to measure drastic changes in object surfaces by a single pattern projection, multiple projections and observations of different patterns becomes necessary. Since it is only possible to perform measurements in situations in which the object is stationary, a great deal of time is consumed to complete all processes and calculations.

[0013] (2) If the form changes of an object's surface are drastic, then it is not possible to make camera observations since the pattern light projected onto the object is blocked by the object itself. In addition, by the pattern light from the projector being blocked by the object, then areas are created in which the object is not touched by the pattern light.

(3) If the subject object is larger than the camera's field of view or the projection area of the projector, it is not possible to make measurements of the form with a single pattern projection, making it necessary to move the object or optical system. In this case, it is easy for differences to arise in the measurement results for the object form at each position to which the object is moved.

[0014] (4) In cases where an object is measured while placed on a standard flat surface, if pattern light greater than a single cycle is blocked by surface variations between the standard surface and object, then the calculated form of the object will be a relative value.

(5) In cases where the irregularities that exist in an object surface represent stepped surface variations, or are some such similarly irregular form, then if the form is calculated without taking into account these heights, then it will not be possible to accurately measure the form of the object.

[0015] (6) In the high sections of the object that has variations on its surface, the pitch against the object surface of the projected pattern light is complicated, and then precision deteriorates for low sections when the pitch matches these high sections.

(7) In cases where the surface variations are extremely high for surface variations between an object and the standard surface, as well as the object surface, the focus of the image taken by the camera and the projected pattern light is shaded off, and then it is not possible to accurately measure the form.

[0016] (8) If changes in the projected pattern light due to patterns, dirt, or small holes in an object surface are not detected, and the form of the overall object is calculated including the observational data for such areas, it is not possible to obtain an accurate form.

(9) In cases where projected pattern light is reflected by an object's material or surface form in which such changes are not detected, if the form of the overall object is calculated including the observational data for such areas, it is not possible to obtain an accurate form.

[0017] This invention is meant to solve the various problems mentioned above, and to that purpose, provides three-dimensional form measurement methods for which it is possible to accurately and speedily measure the three-dimensional form of an object irregardless of changes, irregardless of factors such as form changes, irregularities, or variations in the object surface, patterns, dirt, the object's size, or the object material.

[0018]

[Means for Solving Problems] An invention as in Claim 1 for solving the aforementioned Problem (1) that creates pattern data by composing multiple sinusoid slit pattern data that has different frequency elements and color elements, calculates the form of the object from the per-color element transformed lattice images, together with separating the transformed lattice images obtained by projecting pattern light based on this pattern data onto the object by color elements, and assumes a final three-dimensional form for the object from the compositing of these calculation results; using a three-dimensional form measurement device for objects equipped with a color camera for taking pictures of the surface form of objects, an A/D converter that converts analog image data output from this camera into digital image data, frame memory that stores the digital image data output from the A/D converter, a projector for projecting pattern light onto the object that has arbitrary color and intensity by being configured in directions different from the color camera, pattern memory that stores the pattern data of the pattern light projected by the projector, memory as a work area, a D/A converter that converts digital image data into analog image data, a

display that shows analog image data output from the D/A converter, and a CPU that controls everything and performs calculations.

[0019] An invention as in Claim 2 for solving the aforementioned Problem (1) that creates pattern data by composing multiple sinusoid slit pattern data that has the same frequency elements with different color elements by off-setting the phase per fixed amounts, separates the transformed lattice image obtained by projecting pattern light based on this pattern data onto an object by color elements, and then calculates the three-dimensional form of objects by calculating the phase modulation from between the per color transformed lattice images, with a three-dimensional form measurement device for objects equipped with a color camera for taking pictures of the surface form of objects, an A/D converter that converts analog image data output from this camera into digital image data, frame memory that stores the digital image data output from the A/D converter, a projector for projecting pattern light onto the object that has arbitrary color and intensity by being configured in directions different from the color camera, a pattern memory that stores the pattern data of the pattern light projected by the projector, a memory as a work area, a D/A converter that converts digital image data into analog image data, a display that shows analog image data output from the D/A converter, and a CPU that controls everything and performs calculations.

[0020] An invention as in Claim 3 for solving the aforementioned Problem (2) that, using Claim 1 or 2, radially configures multiple color cameras against an object to take pictures of the object from multiple directions, and then calculates the three-dimensional form of the object by compositing the form data measured based upon the image observed by each camera.

[0021] An invention as in Claim 4 for solving the aforementioned Problem (3) that, using Claim 1 or 2, juxtaposes multiple color cameras against an object so that they divide the flat measurement range of the object, and then calculates the three-dimensional form of the object by compositing the form data measured based upon the image observed by each camera.

[0022] An invention as in Claim 5 for solving the aforementioned Problem (2) that, using Claim 1, 2 or 3, radially configures multiple projectors against an object to project pattern light from multiple directions onto the object, and then calculates the three-dimensional form of the object from form data measured based on images observed by camera via pattern light from each projector.

[0023] An invention as in Claim 6 for solving the aforementioned Problem (3) that, using Claim 1, 2, 3 or 4, juxtaposes multiple projectors against an object so that they divide the flat projection range of the pattern light against the object, and then calculates the three-dimensional form of the object from form data measured based on images observed by camera via pattern light from each projector.

[0024] An invention as in Claim 7 for solving the aforementioned Problem (4) that, using Claim 5 or 6, detects shadow sections generated by surface variations between the reference plane in which the object is placed and the object itself by projecting white and solid-color pattern light onto an object from multiple projectors, detects the contour positions and height of the object by the

shadow sections, based on the projection angle of the pattern light, and then calculates the form of the object by projecting pattern light based on slit pattern data, and corrects the calculated form to an absolute value based on the aforementioned contour position and height.

[0025] An invention as in Claim 8 for solving the aforementioned Problem (5) that, using Claim 5 or 6, detects shadow sections generated by variations on the top of the object surface by projecting white and solid-color pattern light onto the object from multiple projectors, detects the edge positions of surface variations from this shadow information, and detects the height at the edge positions of the surface variations from the projection angle of the pattern light, and then detects the highs and lows on both sides of the edge positions from the projecting direction of the pattern light that generates the shadow sections, and then corrects the calculation results for the three-dimensional form of the object using these detection values.

[0026] An invention as in Claim 9 for solving the aforementioned Problem (6) that, using Claim 8, makes multiple divisions of the planer shape of the object per areas that have the same height, based on the surface variations in the edge positions on the object surface and the contour positions of the object, detects the forms per area by adjusting the frequency elements of the pattern light per divided area, and then calculates an overall three-dimensional image of the object by composing these forms.

[0027] An invention as in Claim 10 for solving the aforementioned Problem (7) that, using Claim 9, uses lenses that can electrically adjust the focus of camera and projector lenses, and, when performing form calculations per areas of the object divided by the areas that have the same height, adjusts the focus of the aforementioned lenses via an interface from a CPU, according to the average height of these areas.

[0028] An invention as in Claim 11 for solving the aforementioned Problem (8) that, using one item from Claims 5~10, calculates the luminance difference of each pixel for images taken by camera of conditions in which pattern light is not projected from all projectors, and images taken by camera of conditions in which pattern light is projected by all projectors, determines if the form is irregular for areas in which this luminance difference is minute, and then measures the three-dimensional form of objects from measurement data from areas other than these areas.

[0029] An invention as in Claim 12 for solving the aforementioned Problem (8) that, using Claim 11, uses lenses that can electrically adjust the aperture of camera and projector lenses, adjusts the aperture of the lens via an interface from a CPU in order to increase the luminance for areas for which it is determined that the luminance difference is minute and the form is irregular from the previous form measurement, calculates the luminance difference under conditions in which the aperture has been adjusted, then divides it into areas for which the luminance difference has changed and areas for which it has not changed due to aperture adjustments for areas for which it was determined that the form was irregular due to the previous form measurements, re-measures the form by projecting pattern light at areas where luminance difference

has changed, determines form irregularity for areas where the luminance difference has not changed, and then measures the three-dimensional form of objects by compositing the previous form measurement results and the measurement results for the new re-measurements.

[0030] An invention as in Claim 13 for solving the aforementioned problem (9) that, using one item from Claims 5~10, extracts the areas where the luminance is saturated due to surface conditions of the object from images taken by camera of conditions in which pattern light is projected from all the projectors, determines if the form is irregular in these areas, and then measures the three-dimensional form of the objects from the measurement data for areas other than these areas.

[0031] An invention as in Claim 14 for solving the aforementioned Problem (9) that, using Claim 13, uses lenses that can electrically adjust the aperture of camera and projector lenses, adjusts the aperture of the lenses via an interface from a CPU in order to reduce the luminance for areas for which the luminance is saturated and it is determined that the form is irregular due to the previous form measurement, re-extracts the luminance saturation area under conditions in which the aperture has been adjusted, then divides it into areas for which the luminance has changed and areas for which it has re-saturated due to aperture adjustments for areas for which it was determined that the form was irregular due to the previous form measurements, re-measures the form by projecting pattern light at areas in which the luminance has changed, determines form irregularities for areas where the luminance has re-saturated, and then measures the three-dimensional form of objects by compositing the previous form measurement results and then the measurement results for the new re-measurements.

[0032]

[Operation] Using an invention as in Claim 1, pattern light that is to be projected onto an object is projected from a projector onto an object as a color image written into pattern memory that is the same as display graphics. At that time, pattern light based on pattern data that synthesizes high and low slit patterns for frequency elements is used as the pattern light to be projected onto an object. Then, pattern data is written into pattern memory so that particular color elements are expressed, and when this pattern light is projected onto an object, transformed lattice images that correspond to the form of the object can be observed by camera.

[0033] When observed transformed lattice images are separated by synthesized color elements, it is possible simultaneously to obtain transformed lattice images obtained in cases where pattern light for many different frequency elements was projected from one color image. It is necessary for high-frequency element patterns to be used for measuring forms with high precision, and, in addition, it is also necessary for low-frequency element patterns to be used in cases where the changes in the form are great.

[0034] With this invention, transformed lattice images are taken from single observations that accompany projection of the pattern light obtained by compositing the aforementioned patterns, and then the forms of objects are measured per color elements. Furthermore, as for the specific method for calculating the form, either the Fourier

transform method or the stripe scanning moiré methods are acceptable. In sections where the form of the object changes drastically (in size), gaps in information are produced by high-frequency element patterns, and there are cases where it is not possible to accurately calculate the form. To that end, first calculate the macro-form from the low-frequency element patterns, and then next measure the three-dimensional form with accuracy and high precision by correcting the gap sections of the macro-form information by using high-frequency element patterns.

[0035] With inventions as in Claim 2, these pattern data are synthesized as different color elements, together with having the same specific frequency elements and creating slit pattern data for which the phase has been shifted by $\pi/2$, π and $3\pi/2$, for example, as synthetic slit patterns to be projected onto an object. Transformed lattice images are taken by projecting this synthesized pattern light onto an object, and then separating it into transformed lattice images per phase through color separation from one transformed lattice images. The three dimensional form of the object is then calculated by obtaining the amount of phase modulation for each pixel from among these images.

[0036] With inventions as in Claim 3, the dead angle produced when observing an object with a camera from certain specific directions is eliminated by observing an object from multiple directions with multiple cameras. Specifically, by composing and interpolating the form data for the observed object from multiple cameras, it becomes possible to make partial measurements of the three-dimensional form of an object that cannot be analyzed by observations along a single direction.

[0037] With inventions as in Claim 4, in cases where the measurement range is wide and the planer shape of an object is large, the picture-taking range is divided by multiple cameras. If form data is synthesized by simultaneously observing the form with multiple cameras, then it is not necessary to move the object or the camera, and it is possible to measure the overall form of an object with a single picture taking.

[0038] With inventions as in Claim 5, multiple projectors configured radially project pattern light onto an object from mutually opposing directions. In cases where the camera is placed directly above an object and the multiple projectors are each placed diagonally upwards, pattern light will strike the areas on the projection side where the object has irregular sections, but on the opposite side, the light is blocked by the irregular sections of the object and pattern light does not reach. With this type of measurement method, in which the form is measured by projecting pattern light, it is not possible to calculate the form for those sections that pattern light does not reach. Accordingly, by projecting pattern light onto an object from different directions using multiple projectors, it is possible to hit all areas of an object's surface with pattern light, and therefore it is possible to measure the entire form of an object without omissions.

[0039] With inventions as in Claim 6, in cases where the planer shape of an object is large and the measurement range is wide, the projection area of the pattern light is divided by multiple projectors. Simultaneously projecting light by multiple projectors, the three-dimensional form of an object is measured from observational data from a single

or multiple cameras. Furthermore, in cases where multiple cameras are used, if form data obtained by each camera is composited, then it is not necessary to move the object or camera, and therefore it is possible to measure the overall form of an object by a single picture-taking.

[0040] Explanation of the operation of an invention as in Claim 7. In cases where the form drastically rises from the reference plane without the contour of the object gradually changing from the reference plane, when the pattern light is hidden greater than one cycle due to surface variations between the object and reference plane, the phase is not accurately detected. Accordingly, measurement results for the top of the object surface show a relative value, and accuracy is lost for the calculated form.

[0041] With regards to this type of object, when white and solid-color pattern light that is the same as regular illumination is projected onto an object, surface variations between the object and reference plane cause shadow sections to be produced. These shadow sections depend on the height of the object's border sections, the projector position and the angle of the pattern light projection, and if the position and projection angle are already known, then it is possible to know the contour position and height of an object from the images observed by camera. It is possible to limit the range of the measurements taken of forms by projection of slit pattern light, based upon the contour position of the object perimeter obtained from projections of pattern light from multiple projectors, and then the amount of operations for measuring the form when calculating the form for only the particular area is reduced.

[0042] Explanation of the operation of an invention as in Claim 8. In cases where pattern light is projected against an object that has variations in its surface form, unlike the invention in Claim 7, shadows sections are produced on the surface of the object. It is possible to calculate the edge positions and heights of the variations on the object surface when these shadow sections are measured. Based on this information, when connected to the amount of phase modulation calculated for all areas, it is possible to measure an accurate form by using the highs and lows of both sides of the edge positions for the calculated surface variations at connections that step over the shadow sections due to grading.

[0043] With inventions as in Claim 9, pattern light is projected against objects that have surface variations in their surface form, the contour positions and height of the object with the edge positions and heights that constitute the surface variations are calculated from the shadow information, and the planer shape of the object is divided by multiple areas that have the same height. When slit patterns for high-frequency elements are projected in the same way to improve the precision for pattern light in low sections of the object, the patterns become tight in high sections of the object, making it impossible to observe them as slit patterns.

[0044] Thus, the frequency elements for slit patterns change corresponding to the heights of the divided areas. If it is possible to express them in terms of the frequency on top of the reference plane, then it becomes possible to observe the same slit pattern across all areas and calculate the form with the same precision, by projecting narrow slit patterns (high-frequency element slit patterns) for areas of

low height and pattern light for wide slit patterns (low-frequency element slit patterns) at high areas.

[0045] Explanation of the operation of an invention as in Claim 10. When the surface variations in the irregular parts on top of an object's surface become large, then the focus of the projecting lens of the projector and the focus of the lens of the observing camera cease to match. Thus, from the positions and heights of the edges of the irregular parts, and the positions and heights of the object's contours, the object surface is divided by areas that have the same height. Therefore, a lens that has an electrical control mechanism is installed into the projector and camera, and the focus of the lens is adjusted by a CPU based on the height of each area. Based on this, it is possible to calculate the three-dimensional form of an object with uniformly high precision.

[0046] Explanation of the operation of an invention as in Claim 11. Projected pattern light cannot be accurately observed in sections where there is dirt, small holes, patterns, or coating on the object surface. These sections will affect other normally observable sections in the same manner, and when the form is calculated, not only these sections, but later connected phases also become indeterminate.

[0047] Accordingly, in order to accurately detect sections of the object surface that have dirt or small holes, an unprojected image is obtained that is observed without projecting pattern light from a projector. This image can be obtained by observing an object which is being struck by external illumination such as a lamp, assuming that initial conditions are not in a complete darkroom state. In addition, it is also possible to obtain an image in a state of total illumination by projecting pattern light identical to normal illumination onto an object.

[0048] Thus, the luminance difference for each pixel from among these images is calculated. If this difference is minute, then even in cases where pattern light is projected, it is not possible to observe changes in the pattern for these pixels. The three-dimensional form of the object is then calculated by determining form irregularities by first detecting the aforementioned sections and then removing the calculation results for the form in these sections, and then using only the data from the sections for which the form can be normally calculated.

[0049] Explanation of the operation of an invention as in Claim 12. There are cases where the reason that projected pattern light was detected as unobservable areas due to factors such as dirt on the object surface originates from insufficient illumination. Therefore, with this invention, a lens that has an electrically controllable aperture is installed in the projector and camera, and then the aperture is adjusted along the direction that the illumination value (luminance) rises even greater than when the prior measurement was taken. At this point, the luminance difference is further calculated, and divided into areas for which observation is possible according to those areas where the pattern is unobservable irregardless of the illumination, as with small holes, and increases in illumination. From the image observed by increasing the illumination, the form of the areas that were deemed irregular the first time are calculated, and it is possible to obtain a uniformly accurate form by compositing the results.

[0050] Explanation of the operation of an invention as in Claim 13. In cases where the measurement subject object's material is a lustrous material such as metal, pattern light projected from a projector is drawn out by irregular reflection. When the form of these reflected sections is calculated the same way as sections for which the pattern is normally observable, an inaccurate form emerges. Therefore, with this invention, the sections that cause these reflections (sections where luminance is saturated) are detected beforehand. Then, patterns that are same as with regular illumination are projected, and images are obtained for total illumination conditions. From these images, the areas for which luminance is saturated are detected, and when the form is calculated by projecting patterns, then it becomes possible to calculate the form accurately by deleting the information from the areas where luminance is saturated.

[0051] Explanation of the operation of an invention as in Claim 14. With areas that produce irregular reflections, the luminance is saturated for a range even wider than the sections that are actually causing the reflections. Therefore, with this invention, a lens that has an electrically controllable aperture is installed in the projector and camera, and then the aperture is adjusted along the direction that the degree of illumination (luminance) drops more than the previous time. Here, the areas where luminance difference is saturated are limited, and are divided by areas where it is possible to observe by dropping the illumination. From the images observed by dropping the illumination, the form of areas that were deemed irregular the first time are calculated, and it is possible to obtain a uniformly accurate form by compositing the results.

[0052]

[Working examples of Invention] The following is an explanation of working examples of each invention with reference to drawings. Fig. 1 is a block drawing showing a working example of this invention, and we will describe a working example of an invention as in Claim 1 while referring to this drawing. First, 101 are the reference plane, and object 102 - which is the subject for three-dimensional form measurement - is placed on top of it. A color camera 103 for making observations is placed right above the object 102, and a projector 104 for projecting pattern light is placed at a diagonally upward direction. This projector 104 is equipped with a light source and lens, the same as with a slide projector, displays patterns that have arbitrary color and intensity onto a color liquid crystal panel built into the projector, and can project pattern light based on these patterns onto the object 102.

[0053] The slit pattern data projected onto object 102 is created by a CPU 109 in three frame RGB parts in pattern memory 107. One frame out of these is composed at 8 bits to a pixel, and the slit patterns are composed so that light bands 201 and dark bands 202 are lined up alternating at fixed intervals, as shown in Fig. 2 (A). The data for x coordinates for the line 203 for which the y coordinates is j in Fig. 2 (A) is shown in Fig. 2 (B). The data g(x) for the x coordinates on this line 203 is created by Formula 2.

[0054]

[Formula 2] $g(x) = 128 \times \sin(x/a \cdot \pi) + 127$

[0055] Here, assuming a range of $0 \leq g(x) \leq 255$, the cycle of the slit pattern is determined by a. Assuming that a is a

number greater than one, low-frequency sine wave patterns in cases where it is large, and high-frequency sine wave patterns in cases where it is small, are created.

[0056] When the same pattern, but each with different frequencies, is created on the three RGB frames of the pattern memory 107, then the x coordinate data 301, 302, 303 on each line 203 of these three frames becomes as in Fig. 3. Here, against data 301, 302 has 1/2 times, and 303 has 1/3 times the frequency elements. These three frames correspond to color RGB, and the data composed for data 301, 302 and 303 becomes as in Fig. 4.

[0057] In Fig. 4, at the point at which the values for composed data for all RGB frames reaches maximum, the pattern light is projected onto the object as white. Conversely, if all RGB frame data 301, 302 and 303 are 0, as at the point 304 in Fig. 4, then at this point, the pattern light is projected onto the object as black. The data 301, 302 and 303 for the three RGB frame parts for this kind of pattern memory 107 is transmitted to the color liquid crystal panel of the projecting projector 104 in Fig. 1 as pattern data, and then color pattern light is projected onto the surface of the object 102 from a light source built into the projector 104, via the projecting lens.

[0058] Pattern light projected onto the object has its picture taken by a color camera 103, and then this image is converted into digital image data by an A/D converter 105. This digital image data is stored in frame memory 106. This image becomes a transformed lattice image that has been altered by the three-dimensional form of the object 102. Since the color transformed lattice images are saved in the RGB frame for frame memory 106 the same as with picture-taking, if the projected patterns are created on RGB per each one pattern, then they will come to be saved as transformed lattice images per frequencies projected onto the RGB frame of frame memory 106. Specifically, separation into color elements identical to picture taking is carried out.

[0059] If these projected patterns are three patterns, then it is possible to color separate at the same time as picture taking by using RGB, but in cases where projection is done by composing patterns greater than four, then hues are provided to each pattern. In the case of composition, composing is done after converting hue information into RGB, and then it comes to be stored in pattern memory 107. At this time, the hues provided to each pattern are made to be mutually exclusive.

[0060] Specifically, in cases where a picture is taken of this pattern and the color is separated, since there comes to be a conversion from RGB to hue, it is necessary for RGB to be combinationally exclusive so that whatever pattern there is at that time is divided. In cases where there is a projection of a pattern composed in this way, the color-separated image will be stored in the memory as a work area 108. Furthermore, in Fig. 1, 110 is the D/A converter, and 111 is the display.

[0061] Fig. 5 shows the luminance on one line of a transformed lattice image created by a high-frequency element pattern out of color-separated patterns. The rising sections of the object 501 surface on this line have an originally two-cycle part pattern projected, but since the pattern is being compacted in the sections 504 corresponding to the rising sections 502 in the image 503

observed from the camera, it is not possible to observe it as a two-cycle part.

[0062] For example, with regards to using methods for obtaining the amount of phase modulation as a form measurement technique, the form of the rising sections 502 become like 601 in Fig. 6, and then calculations are done for a form that differed from 602, which is the original form. On the other hand, gaps are produced in the rising sections 502 as in 701 in Fig. 7 from the transformed lattice images created by pattern projections of low-frequency elements against the same line. However, errors from sine wave patterns due to the lengthening of the cycle pitch become great in pattern projections for low-frequency elements, and although it is possible to grasp the overall form, there is partial loss of form measurement precision.

[0063] Accordingly, it was decided to gradually calculate a precise form from the general form and then correct it, and then calculate the original form 602 in Fig. 6 and Fig. 7, by projecting pattern light for different frequency elements. Specifically, the macro-form is calculated from the pattern light for low-frequency elements, and then the missing macro-form information sections are corrected using pattern light for high-frequency elements. As a result, the rising sections 502 in Fig. 5 are corrected, and the original form 602 shown in Fig. 6 and Fig. 7 is calculated. Furthermore, as for methods for calculating the form, Fourier transform method, electron moiré method, and stripe scanning moiré method are all acceptable.

[0064] Next, an explanation of a working example of an invention as in Claim 2. The x coordinate data $g(x)$ on one line creates compositional pattern data as shown in Fig. 8 as projection pattern data. For the data 1001 in Fig. 8, a phase difference of $\pi/2$ is held at 1002, π at 1003, $3\pi/2$ at 1004, with all of them having the same frequency. A specific hue is provided and composed for this data, converted into RGB, and then stored in pattern memory 107.

[0065] Pattern light based on the aforementioned compositional pattern data is projected by a projector 104, an RGB transformed lattice image observed by a color camera 103 is divided by hue when a pattern has been created, and stored in memory 108. The amount of phase modulation for each pixel is calculated from among these transformed lattice images, and then the three-dimensional form of the object is calculated.

[0066] Fig. 9 and Fig. 10 show a working example of an invention as in Claim 3. In this working example, multiple color cameras are radially configured around an object so that it is possible to observe the object from multiple directions. Color cameras 1201 and 1202 are configured on both sides of the color camera 103, as shown in Fig. 8, and it is made so that the optical axis of each camera 103, 1201, 1202 matches on the reference plane 101. Here, the form of the areas 1204, 1205 on both ends of the object 1203 cannot be observed by the central color camera 103.

[0067] Accordingly, it is good if the form of the object is calculated from the images observed by each camera 103, 1201, 1202 by projecting pattern light onto the object 1203, and then having the areas for 1204 and 1205, which cannot be observed with the central color camera, and 103 supplemented with an image observed by the color cameras

1201 and 1202 on both sides. Furthermore, it is acceptable if the number of color cameras be greater than three.

[0068] Regarding picture-taking of the object 1203, it is acceptable if each camera 103 and 1201, independent A/D converters 105 and 105A for and frame memory 106 and 106A are installed as shown in Fig. 10 (A) and image input is carried out in parallel, or if images are sequentially input by controlling via a CPU 109 a changer 1301 that has been installed between the color cameras 103 and 1201, and the A/D converter 105, with the assumption that the A/D converter 105 and frame memory 106 make up a single system as shown in Fig. 10 (B).

[0069] Fig. 11 is a working example of an invention as in Claim 4, and shows the composition of the observation component in cases where the planer shape of the object 1403 that is the subject for measurement is large. In order to maintain uniform resolution, multiple color cameras 103, 1401 and 1402 are set up in parallel upwards of the object 1403 at the same height, and then observations are made through multiple divisions of the measurement area. Even in this case, it is acceptable if the number of color cameras is greater than three. The measurement areas are determined according to the height and planer shape of the object 1403, so that mutually overlapping areas are created. It is acceptable if the input system from the cameras 103, 1401 and 1402 is either by parallel input or sequential input, as shown in Fig. 10. The form is calculated and results composed for each picture-taking area of the object 1403 based on the observed images according to each camera 103, 1401 and 1402, and then the three-dimensional form of the overall object is measured.

[0070] Fig. 12 is a working example of an invention as in Claim 5, which is one in cases where the object 1502 is projected from different directions by multiple projectors. In Fig. 12, the primary projector 104 and secondary projector 1501 are radially configured against the object, with the color camera 103 placed between. The optical axes of the color camera 103 and projectors 104 and 1502 match on the reference plane 101. Here, it is acceptable if the number of projectors exceeds two.

[0071] With the pattern light projected by the primary projector 104, since the areas 1503 of the object 1502 are blocked by the object 1502 itself, the pattern light is not projected onto the surface of the area 1503. With regards to this area 1503, it is observed by the color camera 103 by projecting pattern light from the secondary projector 1501.

[0072] With regards to the projections from projectors 104 and 1501, independent pattern memory 1601 for the secondary projector is installed as in Fig. 13 (A). Thus, patterns are created that have different color elements from the primary projector 104 for the secondary projector 1501 and stored in pattern memory 1601, are simultaneously projected by the projectors 104 and 1501 by using the pattern data of pattern memory 107 and 1601, and then the color elements are separated by observing the transformed lattice images with the color camera 103.

[0073] In addition, it is also acceptable if a changer 1602 is installed between the projectors 104 and 1501 and a single pattern memory 107, as in Fig. 13 (B), and pattern light from projector 104 and pattern light from projector 1501 are switched and sequentially observed. In this way, the form of each part of the object 1502 from each parallel or

sequentially input image is calculated, and then it is possible to measure the three-dimensional form of the overall object by subsequent image composing.

[0074] Fig. 14 is a working example of an invention as in Claim 6, which is one for cases in which the planer shape of an object 1701 that is the subject for measurement is large. In this working example, each pattern light is projected from different directions by dividing the projection area for the pattern light against the object 1701 from a primary projector 1702 and a secondary projector 1703, juxtaposed against the object 1701. Furthermore, it is acceptable if the number of projectors exceeds two.

[0075] The projecting areas are determined by accounting for the height and planer shape of the object 1701 that is the subject, so that mutually overlapping areas are created. It is acceptable if the projections from each projector are simultaneous or sequential projections as in Fig. 13. The pattern light projected from each projector 1702 and 1703 is observed by a color camera 103, then the form is calculated and results composited for each area of the object from the obtained images, and then the three-dimensional form of the overall object is measured.

[0076] In this working example, it is acceptable if the multiple color cameras are configured as in Fig. 9 and Fig. 11. In such cases, if form data observed by each camera is composited, then it becomes possible to measure the overall form of the object 1701 with a single picture-taking without moving the object 1701 or the camera.

[0077] Fig. 15 shows a working example of an invention as in Claim 7. In this working example, the object contours do not gradually change from the reference plane, however, the invention is one for accurately measuring this, even in cases where the form is one for which there is a drastic rise from the reference plane. In Fig. 15, in cases in which the form of an object 1801 on a reference plane 101 is measured, when pattern light projected from a primary projector 104 is projected so that all RGB are at maximum luminance, specifically, composited pattern light becomes solid white, shadow sections 1802 are produced by surface variations between the reference plane 101 and object 1801. These shadow sections 1802 are dependent on the height 1803 of the contour positions of the object 1801 and the position and pattern light projection angle of the projector 104.

[0078] These conditions are observed by a color camera 103 and then an image is taken. Then, the contour positions and height 1803 of the object 1801 are calculated from the configuration of a known optical system (position and projection angle of the projector 104). In addition, if a secondary projector 1804 is configured on the opposite side of the primary projector through the color camera 103, then it is possible to calculate the contour positions and height 1805 on the opposite side of the object 1801. By configuring multiple projectors in the same manner, it is possible to obtain the contour positions and height of the overall object.

[0079] Next, pattern light that constitutes slit pattern data is projected and observed by the color camera 103. Then the form is calculated only for the areas that exist for object 1801 from the contour positions of the object 1801 detected against the image taken. The form calculated from this is a relative value of the object surface as shown in Fig. 16 (A),

so by tempering this data against the data in Fig. 16 (B) for the previously detected contour position height, final form data is obtain as shown in Fig. 16 (C). Based on this, it is possible to accurately detect the three-dimensional form even for an object 1801 that has a form for which there is a drastic rise from the reference plane.

[0080] Fig. 17 shows a working example of an invention as in Claim 8. This working example is one in which the form of an object that has variations in its surface is accurately measured. As in Fig. 17, in cases where variations 2002 exist in the surface of an object 2001, when the previously described white and solid-colored pattern light is projected from a primary projector 104, shadows sections 2003 are produced from the aforementioned surface variations 2002. When an image is taken by observing these conditions with a color camera 103, then it is possible to calculate the edge positions and height 2004 of the surface variations 2002 from the configuration of a known optical system.

[0081] The shadow sections 2003 are produced by projections from the projector 104, but if white and solid-colored pattern light is projected from the secondary projector installed on the opposite side, then it will not be possible to observe the shadow sections 2003. From this, it is understood that the left side of the surface variations 2002 will be high, while the right side will be low. In this way, when calculations are made from among the images observed by projecting pattern light from multiple directions by multiple projectors, then it is possible to detect the highs and lows of the object surface on both sides of the edge positions of the surface variations 2002.

[0082] Next, pattern light that constitutes slit pattern data is projected from projectors 104 and 2005, and then observed by the color camera 103. The form is calculated from the image taken by the camera 103, and then the form is calculated from the patterns projected by the projector 104, along a direction for which observation of the shadow sections is possible, based on the previously detected information about the shadow sections 2003 of the detected object 2001, and then the three-dimensional form of the object is determined by adjusting the overall form based on these calculation results.

[0083] Fig. 18 shows a working example of an invention as in Claim 9. This working example is one in which the form of an object that has irregular surface variations in its surface is accurately measured. The edge positions and height are detected for an object 2101 that has variations in its surface as in Fig. 18, according to the contours and surface variations of the object 2101, the same as in Fig. 15 and Fig. 17. Based on this information, the planer shape of the object 2102 is divided into multiple areas 2201, 2201 and 2203 as shown in Fig. 19, according to contours and edges that have the same height.

[0084] Here, when pattern light of a single frequency is projected onto the object 2102, then the pattern pitch on the area 2202 becomes 2301, as shown in Fig. 20, and the pattern pitch on the area 2201 because 2302. In cases where this frequency is appropriate for the area 2202, the pattern pitch narrows in area 2201, which is even higher than this area 2202. Accordingly, in cases where the form is changing within area 2201, then the pitch further compacts, and then it is not possible to observe it as a cycle pattern.

[0085] In these cases, the edges are calculated from the average height per area, and then pattern light that has low-frequency elements corresponding to these heights is projected per area. The three-dimensional form of the overall object is then calculated by calculating and compositing the form per area based on projected pattern light. In addition, it is acceptable if the frequency of the projected pattern light increases for the inverse height is low.

[0086] Next is an explanation of a working example of an invention as in Claim 10. When the differences in elevations and the differences of elevation with the reference plane reach maximum on the object surface, then the patterns that are image-formed through lenses according to the height of the object are shaded off, and shading-off occurs even for picture-taking by the camera. In the setup shown in Fig. 21, regional division is taking place the same as in Fig. 19 for an object 2101 that has surface variations as shown in Fig. 18. The average height of the edges of these areas is calculated for each divided area, and then the amount of adjustment of the focus is determined by CPU 109, or the amount of adjustment of the focus based on height is saved in memory 108 as table data beforehand.

[0087] In Fig. 21, the amount of adjustment determined as in the above is transmitted to an interface 2405 for controlling the focus, and then the focus is adjusted through operation of a drive system for focus adjustment of the lenses 2402, 2403 and 2404 for the camera 103 and projectors 104 and 2401. In addition, the number of divisions of area for calculating form is determined by adjusting the focus according to the precision required.

[0088] When the areas divided by the planer shape of the object are 2201, 2202 and 2203 as in Fig. 19, each of these areas are handled as the same area, and the form of the object is calculated by a single picture-taking at a focus set as an initial condition. In cases where further high precision is demanded by conditions, then the areas are handled as the same area since the height between area 2202 and 2203 is relatively close, and then the object form is calculated according to a single focus adjustment and double pattern observations. All of the areas 2201~2203 are handled similarly as individual areas with different heights, and the object form is calculated according to double focus adjustments and triple pattern observations. The number of times these focus adjustments and pattern observations are carried out can be arbitrarily selected based on the time and detection precision provided by the form measurement process.

[0089] Next is an explanation of a working example of an invention as in Claim 11. Cases in which there is dirt 2502 or small holes 2403 on a single line 2501 on the object surface as in Fig. 22 (A) are considered. When pattern light is projected onto this surface, then the luminance that corresponds to the dirt 2502 and holes 2503 becomes like that in areas 2504 and 2505 in Fig. 22 (B) respectively.

[0090] When the form is calculated from these types of patterns, then the form becomes irregular for parts of the areas 2504 and 2505, and it is not possible to accurately obtain an accurate overall form if the form remains connected in this manner. Accordingly, measurements are first taken under non-projected conditions in which no

pattern light is projected from any projector. The luminance of the line 2501 at this time becomes 2601 in Fig. 23 (A), and the luminance for cases in which white and solid-colored pattern light is projected from each projector becomes 2602. This time, in the areas 2603 and 2604 that correspond to dirt 2502 and holes 2503, the difference between luminance 2602 and 2601 becomes small.

[0091] Specifically, in areas 2603 and 2604, even when pattern light is actually projected, it is not possible to observe it as a pattern. In addition, since it is like areas 2603 and 2604 are produced with projections from any directions, it is understood that these areas 2603 and 2604 are not due to surface variations.

[0092] The luminance in cases where pattern light based on slit pattern data is projected becomes like 2605 in Fig. 23 (B). In cases where luminance is analyzed at frequency domains, since areas 2609 and 2610 (areas 2603 and 2604 in Fig. 23 (A)) become noise element data, the data for areas 2609 and 2610 is removed from the luminance 2605 data. Accordingly, individual forms are calculated within the areas 2606, 2607 and 2608 in Fig. 23 (B).

[0093] When the final three-dimensional form of the object is determined, areas 2606, 2607 and 2608 remain connected as is, if it is known, for example that the object surface is basically flat, and then the final results are taken with the assumption that parts of areas 2609 and 2610 remain as form irregularities. In cases where parts are not assumed to be form irregularities as described above, with regards to the final results, a means for correcting the connection on a straight light is determined beforehand for the removed parts (areas 2609 and 2610), and then corrective action is undertaken.

[0094] In addition, in cases where there is no information that becomes a presupposition for determining the final form, pattern light that has a sufficiently longer cycle than the width of the previously described dirt 2502 and holes 2503 is projected, forms calculated from the relative areas 2606, 2607 and 2608 by obtaining the positions for 2701~2704 in Fig. 24 are connected, and then it is possible to determine the overall form of an object. Furthermore, it is possible to apply this working example to cases in which patterns and coating are present on the object surface.

[0095] Next is an explanation of a working example of an invention as in Claim 12. In this working example, the luminance is increased greater than during the previous form measurement for areas where the form is irregular due to dirt, small holes or patterns on the object surface, as shown in Fig. 22. Specifically, the aperture of the lenses 2402~2404 is adjusted by the interface 2405 shown in Fig. 21, and the amount of incident light for the projected pattern light and camera 103 is increased.

[0096] Here, the unprojected luminance for which pattern light is not projected by some projector, and the luminance in cases where solid-colored pattern light is projected as white from each projector, become as with 2801 and 2802, respectively, in Fig. 25. Even if the luminance is increased for the area 2804 in Fig. 25 (corresponding to areas 2604 and 2610 in Fig. 23 due to holes 2503 in Fig. 22), the luminance difference for 2801 and 2802 is minute, and it is not possible to measure even by projecting pattern light. On the other hand, the luminance difference for 2801 and 2802 is increased for area 2803 (corresponding to areas

2603 and 2609 in Fig. 23 due to dirt 2502 in Fig. 22), and if pattern light is projected under these conditions, then it is possible to take measurements.

[0097] Fig. 26 shows the luminance when pattern light based on slit pattern data has been projected. Even in the parts where there is dirt 2502 in Fig. 22 where measurement was not possible the first time, patterns are observed in the area 2901 in Fig. 26, and the form is calculated. By tempering this form with the form obtained the first time, it is possible to measure accurately this form even with objects that have dirt on the surface.

[0098] Next is an explanation of a working example of an invention as in Claim 13. This working example is one for cases in which an object is measured for which the reflection of projected pattern light is strong against its surface, which is composed of a lustrous material such as metal. In Fig. 27 (A), when the pattern light is projected onto an object 3001 composed of material that has strong reflection against its surface, the change in luminance becomes as with 3003 in Fig. 27 (B).

[0099] This time, the luminance observed at an inclination 3002 positive to the projector 104 becomes 3004 at the area 3006 in Fig. 27 (B), and since the saturated state will continue at high luminance, changes as a pattern cannot be obtained. Accordingly, it is not possible to measure accurately the three-dimensional form of an object while areas such as 3006 remain included.

[0100] Therefore, when solid-colored pattern light is projected as white from a projector 104, the luminance reaches 3101 in Fig. 28. As a result, the three-dimensional form of the object is calculated by projecting pattern light only for the areas 3005 and 3007 where there are surface variations from the maximum luminance 3102. This time, process the area 3006 that corresponds to the inclination 3002 as a remaining irregular area.

[0101] Next is an explanation of a working example of an invention as in Claim 14. In this working example, the luminance is reduced for the area 3006 that was determined to be a form irregularity in Fig. 28. The aperture of the lenses 2402~2404 is controlled by the interface 2405 in Fig. 21, and then the quantity of light for the projected pattern light and camera 103 is reduced. Here, when solid-colored pattern light is projected from a projector as white against the object 3001, the luminance becomes as with 3201 in Fig. 29. The luminance difference with the maximum luminance 3102 at the area 3006 previously determined to be a form irregularity is increased, and then it is possible to obtain changes for patterns.

[0102] Changes in luminance when pattern light based on slit pattern data is projected under these conditions are shown as 3301 in Fig. 30. At the area 3006, changes in luminance are obtained, and it is possible to calculate the form for this area. By compositing the form calculated in the first measurement, and the form calculated here, it is possible to obtain the overall form of the object. In addition, it is acceptable if there is removal of the data for when the form is calculated for areas in which the luminance is saturated even if the luminance is reduced, and then processed for those areas as form irregularities.

[0103]

[Effects of Invention] According to the invention in Claim 1 described above, color pattern data is created by

compositing multiple sinusoid slit pattern data of different frequency elements, and then by separating the transformed lattice images into color elements by projecting pattern light based on this data, it is possible to measure the three-dimensional form of an object with drastic changes in a short time and with high precision, from a single observation; specifically, a single image.

[0104] According to the invention in Claim 2, by color separating the transformed lattice images by projecting pattern light based on multiple sinusoid slit pattern data that have the same frequency elements and offset phases, it is possible to obtain the amount of phase modulation in each pixel from among the images for each pattern data that has offset phases from a single image, and it is possible to measure the three-dimensional form of an object in a short time with high precision.

[0105] According to Claim 3, it is possible to mutually interpolate and match the forms by observing an object from multiple directions with multiple cameras, and then measure the three-dimensional form with high precision.

[0106] According to the invention in Claim 4, it is possible to measure the form of an object that has a size greater than a single camera's field of view, or a spherical object, through multiple divisions of the measurement range of the object by using multiple cameras.

[0107] According to the invention in Claim 5, it is possible to eliminate the areas not touched by pattern light because of blocking by the object itself, by projecting pattern light from multiple directions from multiple projectors against an object, and measure a form without omissions through projectors from different directions.

[0108] According to the invention in Claim 6, it is possible to measure without omissions the form of an object that has a size greater than the projection area of a single projector, or an object that has a curved surface, through multiple divisions of the object's projection area by using multiple projectors.

[0109] According to the invention in Claim 7, shadow sections caused by surface variations between the reference plane and object by using multiple projectors are detected, and then the contour positions and height are detected in these shadow sections. Based on this information, since the form is measured only for areas where the object exists, it is possible to reduce the processing time. In addition, since the amount of surface variations is tempered against the calculated object form, it becomes impossible to observe the pattern light projected at stepped sections at any cycle, and it is possible to measure accurately the three-dimensional form of the object.

[0110] With the invention in Claim 8, before pattern light is projected according to slit pattern data for form measurements of an object that has variations in its surface, pattern light that is the same as normal illumination is projected from multiple directions, the height at the edge positions of surface variations is detected from the projection angles of pattern light, and the highs and lows on both sides of the edge positions are detected from the projection direction of the pattern light. Based on this, it is possible to measure accurately the overall form, even with objects that have variations in their surface.

[0111] With the invention in Claim 9, an object is divided into multiple areas of the same height by using the contour

positions and height of the object detected beforehand, and the edge positions and heights of the surface variations on the object surface, and it is possible to measure the form at the same precision at any height, by projecting pattern light that has a cycle that corresponds to the height of these areas. [0112] With the invention in Claim 10, it is possible to measure the form with greater high precision, by adjusting the focus of the camera and projector lenses to correspond to the height of each multiply divided area.

[0113] With the invention in Claim 11, it is possible to measure the three-dimensional form of an object based on data obtained from areas other than those determined to be form irregularities from among areas in which information on dirt, small holes and patterns in the object surface were detected beforehand.

[0114] With the invention in Claim 12, it is possible to reduce the areas assumed to be form irregularities by adjusting the aperture of the lenses of the camera and projector for those areas determined to be form irregularities with low luminance for observed pattern light, and then re-measuring the form only for those areas.

[0115] With the invention in Claim 13, it is possible to measure the three-dimensional form of an object based on data obtained from areas other than those determined to be form irregularities from among areas in which areas of saturated luminance where the projected pattern light reflects on the object surface were detected beforehand.

[0116] With the invention in Claim 14, it is possible to reduce the areas assumed to be form irregularities by adjusting the aperture of the lenses of the camera and projector for those areas where the luminance of pattern light projected by reflections on the object surface is saturated, and then re-measuring the form only for those areas.

[Brief Description of Drawings]

[Fig. 1] A block drawing showing a working example of this invention.

[Fig. 2] An explanatory drawing of the slit pattern and data on one line.

[Fig. 3] An explanatory drawing of data for the three RGB frames.

[Fig. 4] An explanatory drawing of composite data in Fig. 3.

[Fig. 5] A drawing showing the luminance of transformed lattice images caused by high-frequency element pattern light.

[Fig. 6] An explanatory drawing of form measurement errors.

[Fig. 7] A drawing explaining form measurement errors.

[Fig. 8] An explanatory drawing of composite pattern data.

[Fig. 9] A block diagram of the observation component in a working example of this invention.

[Fig. 10] A block drawing of the important parts in a working example of this invention.

[Fig. 11] A block diagram of the observation component in a working example of this invention. [Fig. 12] A block

diagram of the observation component in a working example of this invention.

[Fig. 13] A block drawing of the important parts in a working example of this invention.

[Fig. 14] A block diagram of the observation component in a working example of this invention.

[Fig. 15] A block diagram of the observation component in a working example of this invention.

[Fig. 16] An explanatory drawing of form data measured in a working example of this invention.

[Fig. 17] A block diagram of the observation component in a working example of this invention.

[Fig. 18] A block diagram of the observation component in a working example of this invention.

[Fig. 19] An explanatory drawing of the divided areas of the object planer shape in a working example of this invention.

[Fig. 20] An explanatory drawing of the pattern pitch in a working example of this invention.

[Fig. 21] A block diagram of the observation component in a working example of this invention.

[Fig. 22] An explanatory drawing of the condition of the object surface and luminance in a working example of this invention.

[Fig. 23] Explanatory drawing of luminance in a working example of this invention.

[Fig. 24] Explanatory drawing of luminance in a working example of this invention.

[Fig. 25] Explanatory drawing of luminance in a working example of this invention.

[Fig. 26] Explanatory drawing of luminance in a working example of this invention.

[Fig. 27] An explanatory drawing of the observation conditions and luminance in a working example of this invention.

[Fig. 28] Explanatory drawing of luminance in a working example of this invention.

[Fig. 29] Explanatory drawing of luminance in a working example of this invention.

[Fig. 30] Explanatory drawing of luminance in a working example of this invention.

[Explanation of Codes]

101 Reference Plane

102, 501, 1203, 1403, 1502, 1701, 1801, 2001, 2101, 3001 Object

103, 1201, 1202, 1401, 1402 Color Camera

104, 1501, 1702, 1703, 1804, 2005, 2102, 2401 Projector

105, 105A A/D converter

106, 106A Frame Memory

107, 1601 Pattern Memory

108 Memory

109 CPU

110 D/A converter

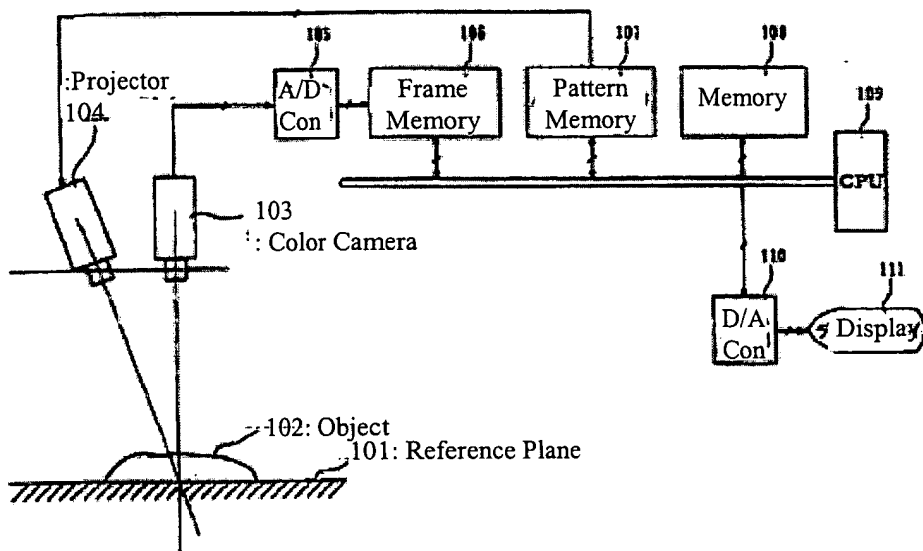
111 Display

1301, 1602 Changer

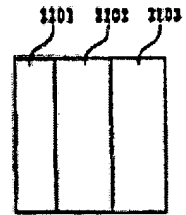
2402, 2403, 2404 Lens

2405 Interface

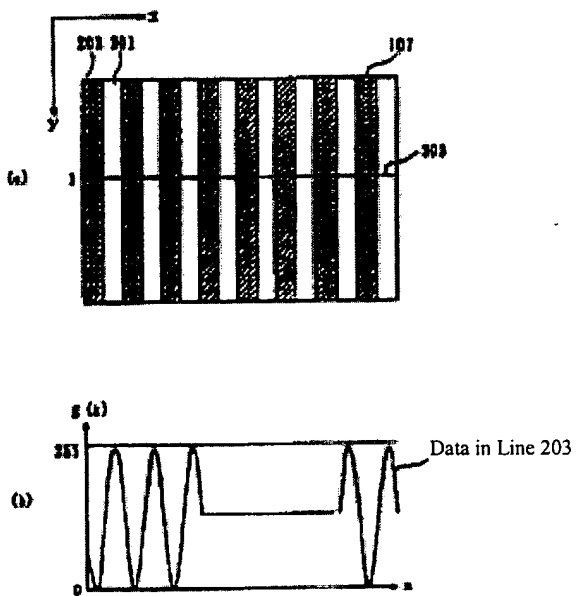
[Fig. 1]



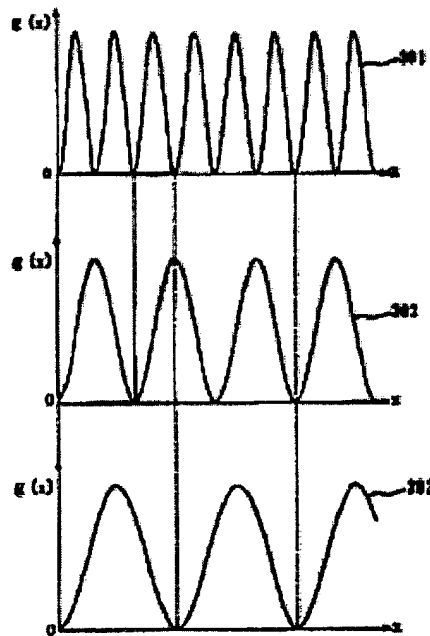
[Fig. 19]



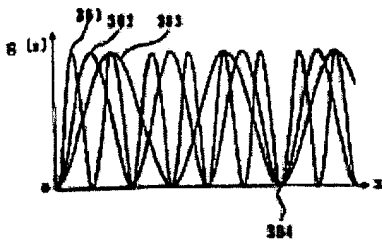
[Fig. 2]



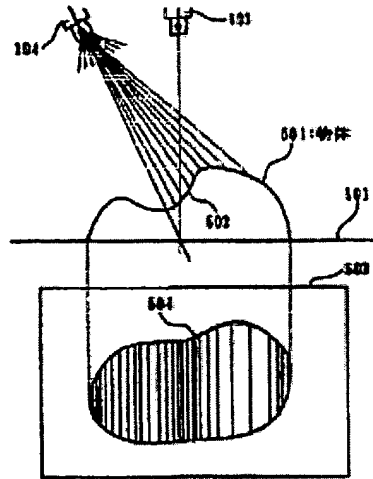
[Fig. 3]



[Fig. 4]



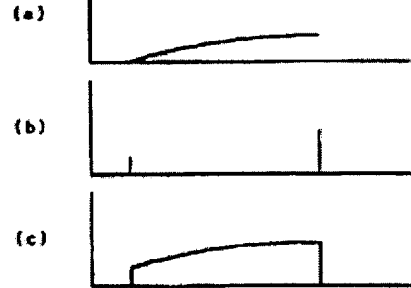
[Fig. 5]



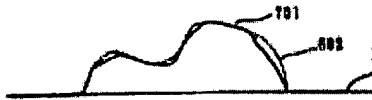
[Fig. 6]



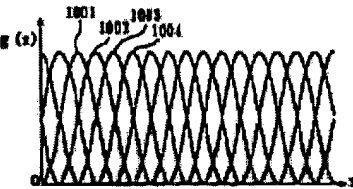
[Fig. 16]



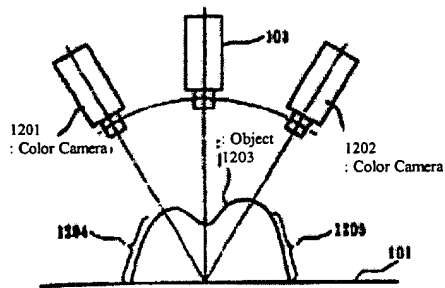
[Fig. 7]



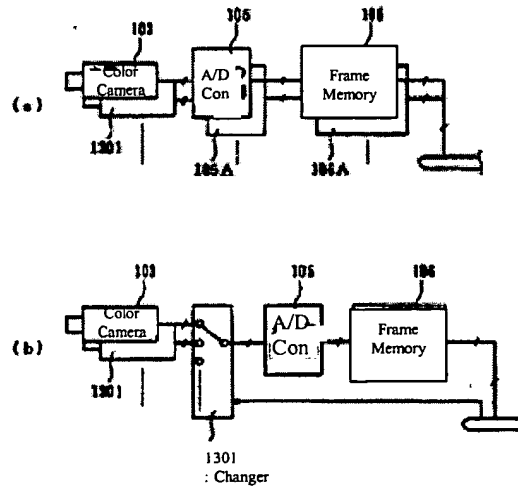
[Fig. 8]



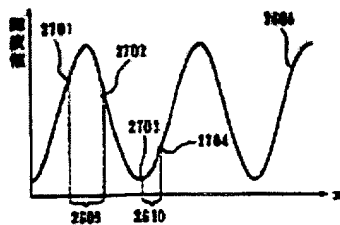
[Fig. 9]



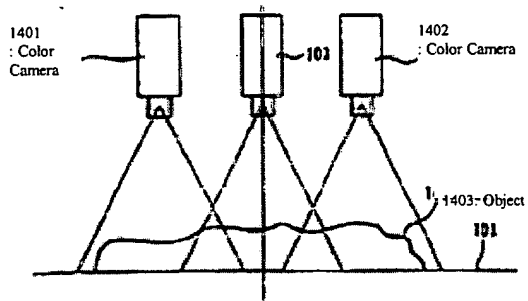
[Fig. 10]



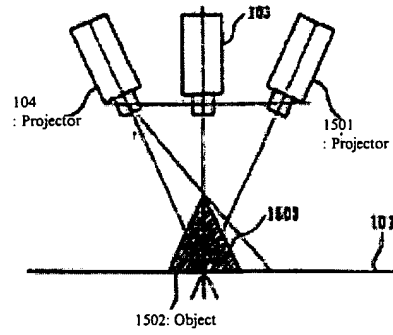
[Fig. 24]



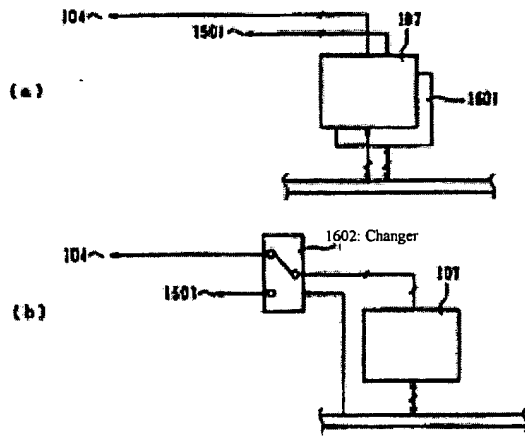
[Fig. 11]



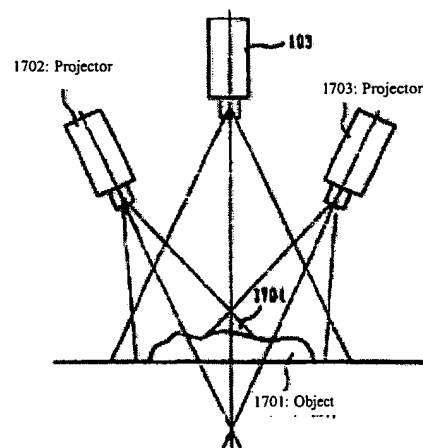
[Fig. 12]



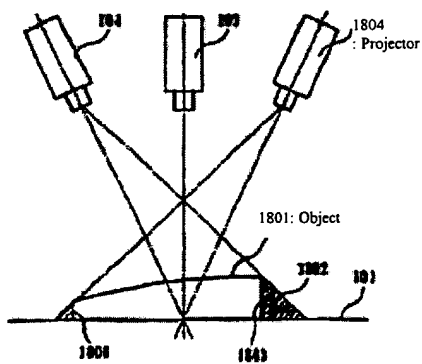
[Fig. 13]



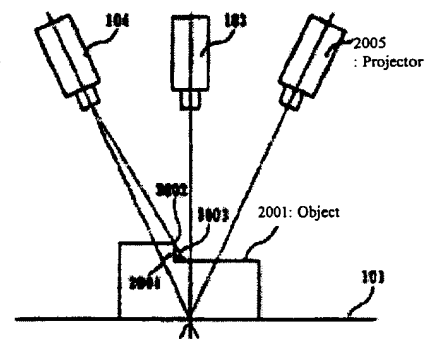
[Fig. 14]



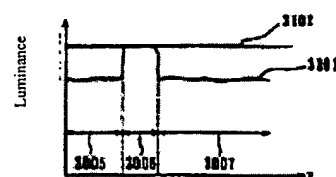
[Fig. 15]



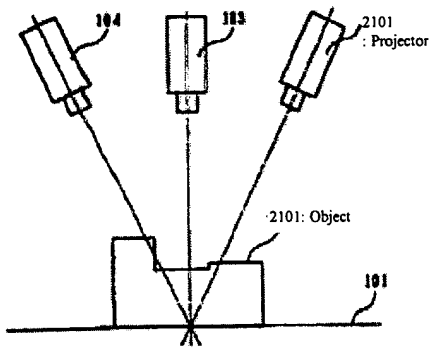
[Fig. 17]



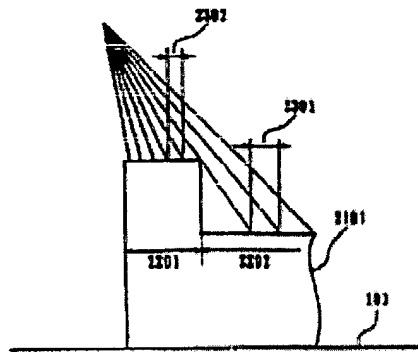
[Fig. 28]



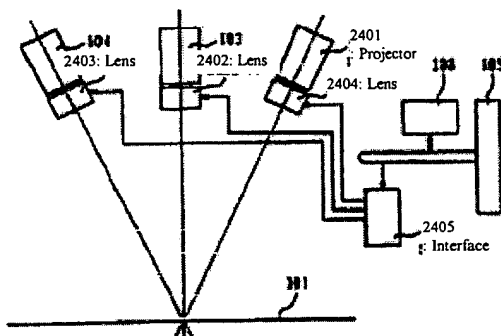
[Fig. 18]



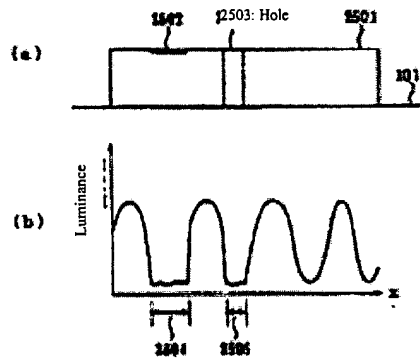
[Fig. 20]



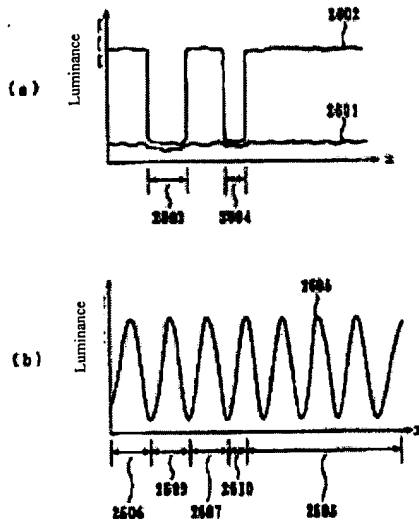
[Fig. 21]



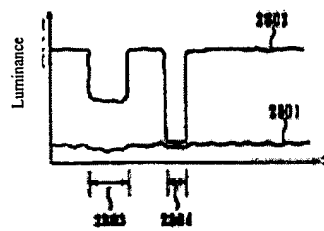
[Fig. 22]



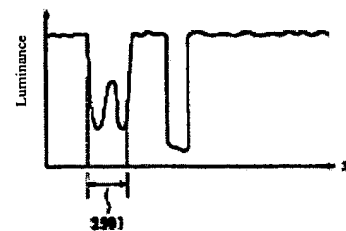
[Fig. 23]



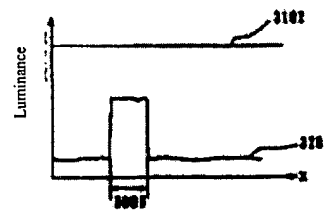
[Fig. 25]



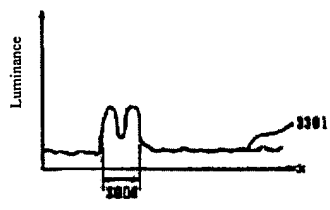
[Fig. 26]



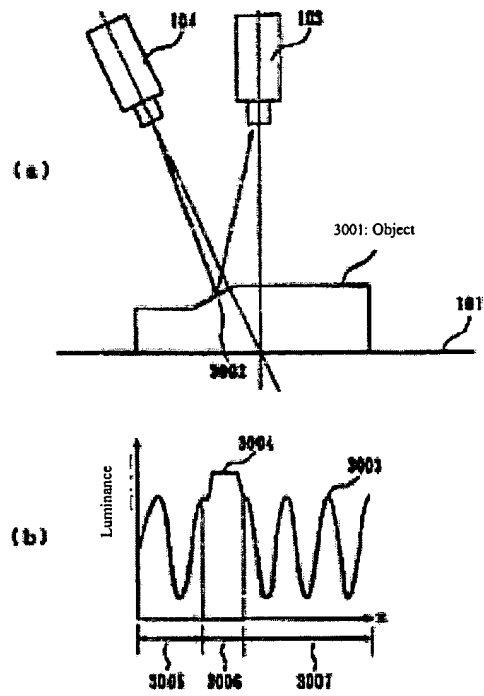
[Fig. 29]



[Fig. 30]



[Fig. 27]



(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開平9-21620

(43) 公開日 平成9年(1997)1月21日

(51) Int.Cl. ⁶	識別記号	庁内整理番号	F I	技術表示箇所
G 0 1 B	11/24		G 0 1 B	11/24 C
G 0 6 T	7/00		G 0 6 F	15/62 4 1 5
	1/00			15/64 M

審査請求 未請求 請求項の数14 F D (全 18 頁)

(21) 出願番号 特願平7-192452

(22) 出願日 平成7年(1995)7月5日

(71) 出願人 000237156

富士ファコム制御株式会社

東京都日野市富士町1番地

(71) 出願人 000005234

富士電機株式会社

神奈川県川崎市川崎区田辺新田1番1号

(72) 発明者 細川 勝美

東京都日野市富士町1番地 富士ファコム

制御株式会社内

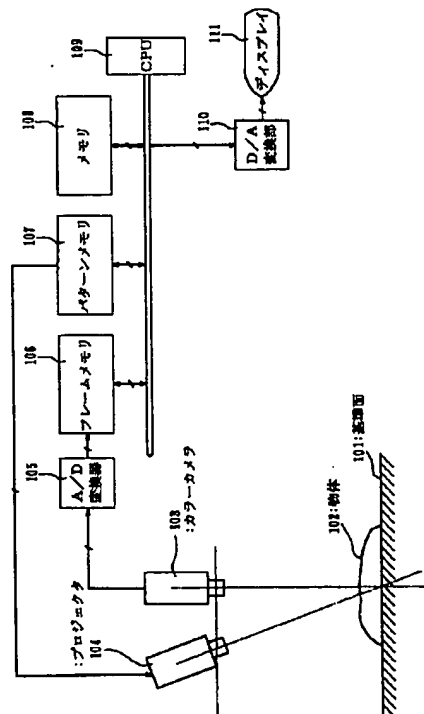
(74) 代理人 弁理士 森田 雄一

(54) 【発明の名称】 物体の三次元形状計測方法

(57) 【要約】

【課題】 物体表面の形状変化や凹凸、段差、模様、汚れ、物体の大きさ、材質等により、物体の三次元形状を正確に計測できない。処理に長時間を要する。

【解決手段】 物体撮像用のカラーカメラ103、A/D変換部105、フレームメモリ106、任意の色及び強度を持つパターン光を物体102に投影するプロジェクタ104、投影パターンデータを格納するパターンメモリ107、メモリ108、D/A変換部110、ディスプレイ111、CPU109を備えた三次元形状計測装置に関する。異なる周波数成分及び色成分を持つ複数の正弦波状のスリットパターンデータを合成してパターンデータを作成する。このデータに基づくパターン光を物体102に投影して得た変形格子画像を色成分ごとに分離し、色成分ごとの変形格子画像から物体102の形状を算出してその結果を統合したものを最終的な三次元形状とする。



【特許請求の範囲】

【請求項1】 物体の表面形状を撮像するカラーカメラと、このカメラから出力されるアナログ画像データをデジタル画像データに変換するA/D変換部と、A/D変換部から出力されるデジタル画像データを格納するフレームメモリと、カラーカメラとは異なる方向に配置されて任意の色と強度を持つパターン光を物体に投影するプロジェクタと、プロジェクタから投影するパターン光のパターンデータを格納するパターンメモリと、作業領域としてのメモリと、デジタル画像データをアナログ画像データに変換するD/A変換部と、D/A変換部から出力されるアナログ画像データを表示するディスプレイと、全体の制御及び演算を実行するCPUとを備えた物体の三次元形状計測装置において、異なる周波数成分及び色成分を持つ複数の正弦波状のスリットパターンデータを合成してパターンデータを作成し、このパターンデータに基づくパターン光を物体に投影して得た変形格子画像を色成分ごとに分離すると共に、色成分ごとの変形格子画像から物体の形状を算出し、この算出結果を統合したものを最終的な物体の三次元形状とすることを特徴とする物体の三次元形状計測方法。

【請求項2】 物体の表面形状を撮像するカラーカメラと、このカメラから出力されるアナログ画像データをデジタル画像データに変換するA/D変換部と、A/D変換部から出力されるデジタル画像データを格納するフレームメモリと、カラーカメラとは異なる方向に配置されて任意の色と強度を持つパターン光を物体に投影するプロジェクタと、プロジェクタから投影するパターン光のパターンデータを格納するパターンメモリと、作業領域としてのメモリと、デジタル画像データをアナログ画像データに変換するD/A変換部と、D/A変換部から出力されるアナログ画像データを表示するディスプレイと、全体の制御及び演算を実行するCPUとを備えた物体の三次元形状計測装置において、異なる色成分で同一の周波数成分を持つ複数の正弦波状のスリットパターンデータを一定量ずつ位相をずらして合成してパターンデータを作成し、このパターンデータに基づくパターン光を物体に投影して得た変形格子画像を色成分ごとに分離すると共に、色成分ごとの変形格子画像間から位相変調量を算出して物体の三次元形状を算出することを特徴とする物体の三次元形状計測方法。

【請求項3】 請求項1または2記載の三次元形状計測方法において、物体を多方向から撮像するように複数台のカラーカメラを物体に対して放射状に配置し、各カメラによる観測画像に基づいて計測された形状データを合成して物体の三次元形状を算出することを特徴とする物体の三次元形状計測方法。

【請求項4】 請求項1または2記載の三次元形状計測

方法において、

物体の平面的な計測範囲を分割するように複数台のカラーカメラを物体に対して並置し、各カメラによる観測画像に基づいて計測された形状データを合成して物体の三次元形状を算出することを特徴とする物体の三次元形状計測方法。

【請求項5】 請求項1、2または3記載の三次元形状計測方法において、

物体に多方向からパターン光を投影するように物体に対して複数台のプロジェクタを放射状に配置し、各プロジェクタからのパターン光によるカメラ観測画像に基づいて計測された形状データから物体の三次元形状を算出することを特徴とする物体の三次元形状計測方法。

【請求項6】 請求項1、2、3または4記載の三次元形状計測方法において、

物体に対するパターン光の平面的な投影範囲を分割するように複数台のプロジェクタを物体に対して並置し、各プロジェクタからのパターン光によるカメラ観測画像に基づいて計測された形状データから物体の三次元形状を算出することを特徴とする物体の三次元形状計測方法。

【請求項7】 請求項5または6記載の三次元形状計測方法において、

複数台のプロジェクタにより白色かつ無地のパターン光を物体に投影して物体が置かれた基準面と物体との段差により発生する陰影部分を検出し、パターン光の投影角度に基づき陰影部分における物体の輪郭位置及び高さを検出すると共に、この輪郭位置情報により物体が存在すると判定された領域のみを対象として、スリットパターンデータに基づくパターン光を投影して物体の形状を算出し、この算出された形状を前記輪郭位置及び高さに基づいて絶対的な値に補正することを特徴とする物体の三次元形状計測方法。

【請求項8】 請求項5または6記載の三次元形状計測方法において、

複数台のプロジェクタにより白色かつ無地のパターン光を物体に投影して物体表面上の段差により発生する陰影部分を検出し、この陰影情報から段差のエッジ位置を検出すると共に、パターン光の投影角度から段差のエッジ位置での高さを検出し、かつ陰影部分を発生させたパターン光の投影方向からエッジ位置の両側における高低を検出し、これらの検出値を用いて物体の三次元形状の算出結果を補正することを特徴とする物体の三次元形状計測方法。

【請求項9】 請求項8記載の三次元形状計測方法において、

物体表面上の段差のエッジ位置と物体の輪郭位置とにより、同一の高さを持つ領域ごとに物体の平面形状を複数に分割し、分割された領域ごとにパターン光の周波数成分を調整して領域ごとに形状を算出し、これらの形状を合成して物体の全体的な三次元形状を算出することを特

徴とする物体の三次元形状計測方法。

【請求項10】 請求項9記載の三次元形状計測方法において、カメラ及びプロジェクタのレンズとして焦点を電氣的に調整可能なレンズを用いると共に、同一の高さを持つ領域ごとに分割された物体の領域ごとの形状算出に際し、これらの領域の平均的な高さに従って、前記レンズの焦点をCPUによりインターフェースを介して調整することを特徴とする物体の三次元形状計測方法。

【請求項11】 請求項5～10の何れか1項に記載の三次元形状計測方法において、すべてのプロジェクタからパターン光を投影しない状態をカメラにより観測した画像と、すべてのプロジェクタからパターン光を投影した状態をカメラにより観測した画像との、各画素における輝度差を算出し、この輝度差が微小となる領域では形状が不定と判定し、この領域以外の領域による測定データから物体の三次元形状を計測することを特徴とする物体の三次元形状計測方法。

【請求項12】 請求項11記載の三次元形状計測方法において、カメラ及びプロジェクタのレンズとして絞りを電氣的に調整可能なレンズを用いると共に、前回の形状計測により輝度差が微小となって形状が不定と判定された領域に対し、輝度値を上げるためにレンズの絞りをCPUによりインターフェースを介して調整し、絞りを調整した状態で輝度差を再度算出し、前回の形状計測により形状が不定と判定された領域について絞りの調整により輝度差が変化した領域と変化した領域とに分離し、輝度差が変化した領域についてはパターン光を投影して形状を再度計測し、輝度差が変化しない領域については形状不定と判定し、前回の形状計測結果と再度計測した今回の計測結果とを統合して物体の三次元形状を計測することを特徴とする物体の三次元形状計測方法。

【請求項13】 請求項5～10の何れか1項に記載の三次元形状計測方法において、すべてのプロジェクタからパターン光を投影した状態をカメラにより観測した画像から、物体の表面状態により輝度値が飽和する領域を抽出し、この領域では形状が不定と判定すると共に、この領域以外の領域による測定データから物体の三次元形状を計測することを特徴とする物体の三次元形状計測方法。

【請求項14】 請求項13記載の三次元形状計測方法において、カメラ及びプロジェクタのレンズとして絞りを電氣的に調整可能なレンズを用いると共に、前回の形状計測により輝度値が飽和して形状が不定と判定された領域に対し、輝度値を下げるためにレンズの絞りをCPUによりインターフェースを介して調整し、絞りを調整した状態で輝度値の飽和領域を再度抽出し、前回の形状計測により形状が不定と判定された領域について絞りの調整によ

り輝度値が変化した領域と輝度値が再度飽和した領域とに分離し、輝度値が変化した領域についてはパターン光を投影して形状を再度計測し、輝度値が再度飽和した領域については形状不定と判定し、前回の形状計測結果と再度計測した今回の計測結果とを統合して物体の三次元形状を計測することを特徴とする物体の三次元形状計測方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、プロジェクタからパターン光を投影して得た変形格子画像をカラーカメラにより撮像し、物体の三次元形状を非接触で計測する物体の三次元形状計測方法に関する。

【0002】

【従来の技術】物体の三次元形状を非接触で計測する方法として、基準となるパターン光を物体に投影して物体の形状を計測する方式が知られている。この方式の原理は、物体に対して、例えば格子状のスリット光やレーザ光による干渉光などの基準パターン光を投影する。これらの基準パターンとしては、小さい物体に対してはレーザ光による干渉縞が用いられ、また、大きい物体に対しては、格子パターンをフィルム等に作成してスライドプロジェクタ等の光源により投影したり、フィルムの代わりに液晶素子を使用して発生させた任意のパターンが用いられている。

【0003】基準パターンが投影された物体を、その基準パターンが投影された方向とは異なる方向からカメラで観測すると、パターン光が物体の形状によって変形を受けた変形格子画像が観測される。この格子画像の変形状態を解析することにより、元の物体の三次元形状を得ることができる。

【0004】変形格子画像を解析する方式には、種々のものが提案されている。例えば、第1の方式として、投影するパターンの位相をシフトし、シフトしたパターンによる変形格子画像間の各画素の位相を計算して元の形状を算出する縞走査法または位相シフト法（小松原、吉澤：“縞走査を導入した格子パターン投影法”，精密学会誌，Vol.55，No.10，pp1817～1822（1989））がある。

【0005】第2の方式として、一つの投影パターンによる変形格子画像を周波数領域に変換し、必要な周波数成分のみを抽出することで形状を算出するフーリエ変換法（M. Takeda, K. Mutoh：“Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3-D object shapes”，APPLIED OPTICS, Vol.22, No. 24, pp3977～3982（1983））がある。

【0006】第3の方式として、カメラの走査線に合わせたパターンを投影して観測された変形格子画像と、カメラの走査線を観測側の基準格子として得られるモアレ像とから形状を算出する走査モアレ法（新井、倉田：

“縞走査干渉計の手法による高速かつ高分解能なモアレトポグラフィ法”，光学，Vol.15，No.5，pp402～406（1986）がある。

【0007】更に第4の方式として、一つの投影パターンによる変形格子画像と計算機内で作成した複数の位相のずれた参照パターンとの間のモアレ像を計算機により作成し、これらのモアレ像の間の位相から形状を算出する位相シフト電子モアレ法（加藤，山口：“位相シフト電子モアレを用いた縞画像の実時間処理”，センサ技術，Vol.12，No.7，pp39～44（1992））がある。

【0008】いずれの方式においても、観測された各画素において得られる縞の強度分布 $I(x,y)$ を数式1により定義して、各点における位相情報 $\phi(x,y)$ を算出している。

【0009】

【数1】 $I(x,y) = A(x,y) + B(x,y) \cdot \cos(2\pi f x + \phi(x,y))$

【0010】ここで、 ϕ は物体の形状を反映している情報であり、この ϕ を求めることができれば形状を算出することができる。各点における位相情報 ϕ は、 $-\pi \leq \phi \leq \pi$ （方式によっては $-\pi/2 \leq \phi \leq \pi/2$ とされている）の範囲に折り畳まれ、不連続な値をとる。これを位相アンラッピング法（K. Itoh：“Analysis of the phase unwrapping algorithm”，APPLIED OPTICS, Vol.21, No.14, pp2470（1982）参照）と呼ばれる方法などにより接続し、連続した位相分布を得る。そして、最終的な形状として、カメラや光源などの光学的位置関係をもとに、位相を空間内での物体の三次元形状に変換する。

【0011】これらの方式は、主に表面形状の変化が急峻ではない物体に対して適用されている。

【0012】

【発明が解決しようとする課題】上述したようにパターン光を投影して物体の三次元形状を計測する従来技術には、次のような課題が存在する。

①1回のパターン投影では物体表面の急峻な変化を計測できないため、何回かの異なるパターン投影及び観測が必要になる。物体が静止している状態での計測しか行えないため、全体的な処理や演算に多くの時間がかかる。

【0013】②物体表面の形状変化が急峻であると、物体に投影されたパターン光が物体により遮蔽されるためカメラで観測できない。また、プロジェクタからのパターン光が物体により遮蔽され、パターン光が当たらない領域が発生する。

③対象物体がカメラの視野やプロジェクタの投影領域よりも大きいと、1回のパターン投影で形状を計測できず、物体または光学系を移動させる必要がある。この場合、各移動位置での物体形状の計測結果に誤差が生じやすい。

【0014】④物体が基準となる平面に置かれた状態で

計測する場合、その基準面と物体との段差内に一周期以上のパターン光が隠れてしまうと、算出された物体の形状は相対的な値になってしまう。

⑤物体表面に存在する凹凸が、階段状の段差か、またはそれに近い凹凸形状である場合、これらの高さが考慮されない状態で形状を算出すると物体の形状を正確に計測できない。

【0015】⑥表面上に段差がある物体の高い部分では、投影されたパターン光の物体表面におけるピッチが混み入ってしまい、この高い部分にピッチを合わせると低い部分での精度が劣化する。

⑦物体と基準面との段差や、物体表面上での段差が非常に大きい場合、カメラで観測した画像の焦点や投影したパターン光が量けてしまい、形状を正確に測定することができない。

【0016】⑧物体表面での模様や汚れ、小径の孔などにより投影したパターン光の変化が検出されず、それらの領域の観測データを含めて物体全体の形状を算出すると、正確な形状が得られない。

⑨物体の材質や表面形状により投影したパターン光が反射する場合にはその変化が検出されず、それらの領域の観測データを含めて物体全体の形状を算出すると、正確な形状が得られない。

【0017】本発明は上記種々の課題を解決するためになされたもので、その目的とするところは、物体表面の形状変化や凹凸や段差、模様、汚れ、物体の大きさ、材質等の様々な要因に関わらず、正確かつ高速に物体の三次元形状を計測可能な三次元形状計測方法を提供することにある。

【0018】

【課題を解決するための手段】前記課題①を解決するため、請求項1記載の発明は、物体の表面形状を撮像するカラーカメラと、このカメラから出力されるアナログ画像データをデジタル画像データに変換するA/D変換部と、A/D変換部から出力されるデジタル画像データを格納するフレームメモリと、カラーカメラとは異なる方向に配置されて任意の色と強度を持つパターン光を物体に投影するプロジェクタと、プロジェクタから投影するパターン光のパターンデータを格納するパターンメモリと、作業領域としてのメモリと、デジタル画像データをアナログ画像データに変換するD/A変換部と、D/A変換部から出力されるアナログ画像データを表示するディスプレイと、全体の制御及び演算を実行するCPUとを備えた物体の三次元形状計測装置において、異なる周波数成分及び色成分を持つ複数の正弦波状のスリットパターンデータを合成してパターンデータを作成し、このパターンデータに基づくパターン光を物体に投影して得た変形格子画像を色成分ごとに分離すると共に、色成分ごとの変形格子画像から物体の形状を算出し、この算出結果を統合したものを最終的な物体の三次

元形状とする。

【0019】前記課題①を解決するため、請求項2記載の発明は、物体の表面形状を撮像するカラーカメラと、このカメラから出力されるアナログ画像データをデジタル画像データに変換するA/D変換部と、A/D変換部から出力されるデジタル画像データを格納するフレームメモリと、カラーカメラとは異なる方向に配置されて任意の色と強度を持つパターン光を物体に投影するプロジェクタと、プロジェクタから投影するパターン光のパターンデータを格納するパターンメモリと、作業領域としてのメモリと、デジタル画像データをアナログ画像データに変換するD/A変換部と、D/A変換部から出力されるアナログ画像データを表示するディスプレイと、全体の制御及び演算を実行するCPUとを備えた物体の三次元形状計測装置において、異なる色成分で同一の周波数成分を持つ複数の正弦波状のスリットパターンデータを一定量ずつ位相をずらして合成してパターンデータを作成し、このパターンデータに基づくパターン光を物体に投影して得た変形格子画像を色成分ごとに分離すると共に、色成分ごとに変形格子画像間から位相変調量を算出して物体の三次元形状を算出する。

【0020】前記課題②を解決するため、請求項3記載の発明は、請求項1または2において、物体を多方向から撮像するように複数台のカラーカメラを物体に対して放射状に配置し、各カメラによる観測画像に基づいて計測された形状データを合成して物体の三次元形状を算出する。

【0021】前記課題③を解決するため、請求項4記載の発明は、請求項1または2において、物体の平面的な計測範囲を分割するように複数台のカラーカメラを物体に対して並置し、各カメラによる観測画像に基づいて計測された形状データを合成して物体の三次元形状を算出する。

【0022】前記課題②を解決するため、請求項5記載の発明は、請求項1、2または3において、物体に多方向からパターン光を投影するように物体に対して複数台のプロジェクタを放射状に配置し、各プロジェクタからのパターン光によるカメラ観測画像に基づいて計測された形状データから物体の三次元形状を算出する。

【0023】前記課題③を解決するため、請求項6記載の発明は、請求項1、2、3または4において、物体に対するパターン光の平面的な投影範囲を分割するように複数台のプロジェクタを物体に対して並置し、各プロジェクタからのパターン光によるカメラ観測画像に基づいて計測された形状データから物体の三次元形状を算出する。

【0024】前記課題④を解決するため、請求項7記載の発明は、請求項5または6において、複数台のプロジェクタにより白色かつ無地のパターン光を物体に投影して物体が置かれた基準面と物体との段差により発生する

陰影部分を検出し、パターン光の投影角度に基づき陰影部分における物体の輪郭位置及び高さを検出すると共に、この輪郭位置情報により物体が存在すると判定された領域のみを対象として、スリットパターンデータに基づくパターン光を投影して物体の形状を算出し、この算出された形状を前記輪郭位置及び高さに基づいて絶対的な値に補正する。

【0025】前記課題⑤を解決するため、請求項8記載の発明は、請求項5または6において、複数台のプロジェクタにより白色かつ無地のパターン光を物体に投影して物体表面上の段差により発生する陰影部分を検出し、この陰影情報から段差のエッジ位置を検出すると共に、パターン光の投影角度から段差のエッジ位置での高さを検出し、かつ陰影部分を発生させたパターン光の投影方向からエッジ位置の両側における高低を検出し、これらの検出値を用いて物体の三次元形状の算出結果を補正する。

【0026】前記課題⑥を解決するため、請求項9記載の発明は、請求項8において、物体表面上の段差のエッジ位置と物体の輪郭位置とにより、同一の高さを持つ領域ごとに物体の平面形状を複数に分割し、分割された領域ごとにパターン光の周波数成分を調整して領域ごとに形状を算出し、これらの形状を合成して物体の全体的な三次元形状を算出する。

【0027】前記課題⑦を解決するため、請求項10記載の発明は、請求項9において、カメラ及びプロジェクタのレンズとして焦点を電氣的に調整可能なレンズを用いると共に、同一の高さを持つ領域ごとに分割された物体の領域ごとの形状算出に際し、これらの領域の平均的な高さに従って、前記レンズの焦点をCPUによりインターフェースを介して調整する。

【0028】前記課題⑧を解決するため、請求項11記載の発明は、請求項5～10の何れか1項において、すべてのプロジェクタからパターン光を投影しない状態をカメラにより観測した画像と、すべてのプロジェクタからパターン光を投影した状態をカメラにより観測した画像との、各画素における輝度差を算出し、この輝度差が微小となる領域では形状が不定と判定し、この領域以外の領域による測定データから物体の三次元形状を計測する。

【0029】前記課題⑨を解決するため、請求項12記載の発明は、請求項11において、カメラ及びプロジェクタのレンズとして絞りを電氣的に調整可能なレンズを用いると共に、前回の形状計測により輝度差が微小となって形状が不定と判定された領域に対し、輝度値を上げるためにレンズの絞りをCPUによりインターフェースを介して調整し、絞りを調整した状態で輝度差を再度算出し、前回の形状計測により形状が不定と判定された領域について絞りの調整により輝度差が変化した領域と変化しない領域とに分離し、輝度差が変化した領域につい

てはパターン光を投影して形状を再度計測し、輝度差が変化しない領域については形状不定と判定し、前回の形状計測結果と再度計測した今回の計測結果とを統合して物体の三次元形状を計測する。

【0030】前記課題⑤を解決するため、請求項13記載の発明は、請求項5～10の何れか1項において、すべてのプロジェクタからパターン光を投影した状態をカメラにより観測した画像から、物体の表面状態により輝度値が飽和する領域を抽出し、この領域では形状が不定と判定すると共に、この領域以外の領域による測定データから物体の三次元形状を計測する。

【0031】前記課題⑤を解決するため、請求項14記載の発明は、請求項13において、カメラ及びプロジェクタのレンズとして絞りを電氣的に調整可能なレンズを用いると共に、前回の形状計測により輝度値が飽和して形状が不定と判定された領域に対し、輝度値を下げるためにレンズの絞りをCPUによりインターフェースを介して調整し、絞りを調整した状態で輝度値の飽和領域を再度抽出し、前回の形状計測により形状が不定と判定された領域について絞りの調整により輝度値が変化した領域と輝度値が再度飽和した領域とに分離し、輝度値が変化した領域についてはパターン光を投影して形状を再度計測し、輝度値が再度飽和した領域については形状不定と判定し、前回の形状計測結果と再度計測した今回の計測結果とを統合して物体の三次元形状を計測する。

【0032】

【作用】請求項1の発明において、物体に投影されるパターン光は、ディスプレイのグラフィックスと同様に、パターンメモリに書かれたカラー画像としてプロジェクタから物体に投影される。その際、物体に投影するパターン光として、周波数成分の高いスリットパターンと低いスリットパターンとを合成したパターンデータに基づくものを用いる。この際、パターンメモリには、特定の色成分を表現するようなパターンデータが書き込まれ、このパターン光を物体に投影すると、物体の形状に応じた変形格子画像がカメラにより観測される。

【0033】観測した変形格子画像を合成した色成分ごとに分離すると、複数の異なる周波数成分のパターン光を投影した場合に得られる変形格子画像を、1枚のカラー画像から同時に得ることができる。形状を高精度に計測するためには高い周波数成分のパターンを用いる必要があり、また、形状の変化が大きい場合には、低い周波数成分のパターンを用いる必要がある。

【0034】この発明では、これらのパターンを合成して得たパターン光を投影すると共に一度の観測で変形格子画像を取り込み、色成分ごとに物体の形状を計測する。なお、形状を算出する具体的な方式は、フーリエ変換法でも、電子モアレ法でも、縞走査モアレ法でも良い。物体の形状が急峻に（大きく）変化する部分では、高い周波数成分のパターンからは情報の欠落が生じ、形

状を正確に算出できないことがある。そのためにもまず、低い周波数成分のパターンからマクロ的な形状を算出しておき、次いで高い周波数成分のパターンを用いてマクロ的な形状情報の欠落部分を補正することにより、正確かつ高精度に三次元形状を計測する。

【0035】請求項2記載の発明では、物体に投影する合成スリットパターンとして、特定の同一周波数成分を有し、かつ、位相を例えば $\pi/2$ 、 π 、 $3\pi/2$ ずつシフトしたスリットパターンデータを作成すると共に、これらのパターンデータを異なる色成分として合成する。この合成されたパターン光を物体に投影して変形格子画像を撮像し、1枚の変形格子画像から色分離により各位相ごとの変形格子画像に分解する。これらの画像間の各画素において、位相変調量を求めて物体の三次元形状を算出する。

【0036】請求項3記載の発明では、複数台のカメラにより物体を多方向から観測することで、1台のカメラにより特定方向から観測する際に発生する死角をなくす。すなわち、複数台のカメラにより観測した物体の形状データを合成し補間することにより、一方向からの観測では解析不能な物体の部分的な三次元形状も計測できるようになる。

【0037】請求項4記載の発明では、物体の平面形状が大きくその計測範囲が広い場合に、複数台のカメラによって撮像範囲を分割する。複数台のカメラにより物体を同時に観測して形状データを合成すれば、物体またはカメラを移動させる必要がなく、1回の撮像により物体の全体的な形状を計測することができる。

【0038】請求項5記載の発明では、放射状に配置された複数台のプロジェクタが、互いに異なる方向から物体にパターン光を投影する。カメラを物体の真上に配置し、複数台のプロジェクタをそれぞれ斜め上方に配置した場合、物体の凹凸部分では投影部側の領域にはパターン光が当たるが、その反対側では物体の凹凸部分により遮られてパターン光が当たらなくなる。パターン光を投影して形状を計測するこの種の計測方法では、パターン光が当たらない部分の形状を算出することができない。従って、複数台のプロジェクタを用いて異なった方向から物体にパターン光を投影することで、パターン光を物体表面の全領域に当てることができ、物体の全体形状を欠落なく計測することが可能になる。

【0039】請求項6記載の発明では、物体の平面形状が大きくその計測範囲が広い場合に、複数台のプロジェクタによりパターン光の投影領域を分割する。複数台のプロジェクタにより同時に投影し、1台または複数台のカメラによる観測データから物体の三次元形状を計測する。なお複数台のカメラを用いた場合には、各カメラにより得た形状データを合成すれば、物体またはカメラを移動させる必要がなく、1回の撮像により物体の全体的な形状を計測することができる。

【0040】請求項7記載の発明の作用を説明する。物体の輪郭が基準面から徐々に変化せず、基準面から急峻に立ち上がるような形状を持つ場合、投影されたパターン光が物体と基準面との段差により1周期以上隠れてしまうと、位相が正確に検出されない。よって、物体表面上での計測結果は相対的な値となり、算出された形状は正確でなくなる。

【0041】このような物体に対して、通常の照明と同様の白色かつ無地のパターン光を物体に投影すると、物体と基準面との段差に起因して陰影部分が発生する。この陰影部分は、物体の境界部分の高さ、プロジェクタの位置、パターン光の投影角度に依存し、この位置及び投影角度が既知であれば、カメラによる観測画像から物体の輪郭位置及び高さを知ることができる。複数のプロジェクタによるパターン光の投影により得られた物体全周の輪郭位置をもとに、スリットパターン光を投影して形状を計測する範囲を限定することができ、その領域に対してのみ形状を算出すれば形状計測のための演算量が軽減される。

【0042】請求項8記載の発明の作用を説明する。表面形状に段差を持つ物体に対してパターン光を投影した場合、請求項7の発明と異なり、物体の表面上に陰影部分が発生する。この陰影部分を計測すると、物体表面上の段差のエッジ位置及び高さを算出することができる。この情報に基づいて、全領域において算出された位相変動量の接続に際し、段差による陰影部分を跨ぐ接続では、算出された段差のエッジ位置の両側の高低を利用して正確な形状を測定することができる。

【0043】請求項9記載の発明では、表面形状に段差を持つ物体に対してパターン光を投影して、段差を構成するエッジ位置及び高さや物体の輪郭位置及び高さを陰影情報から算出し、物体の平面形状を同一の高さを持つ複数の領域に分割する。パターン光は、物体の低い部分で精度を良くするために高い周波数成分のスリットパターンを一樣に投影すると、物体の高い部分ではパターンが密になり、スリットパターンとして観測できなくなる。

【0044】そこで、分割された領域ごとの高さに応じてスリットパターンの周波数成分を変化させる。基準面上での周波数で言えば、高さの低い領域には狭いスリットパターン（高い周波数成分のスリットパターン）、高い領域では広いスリットパターン（低い周波数成分のスリットパターン）のパターン光を投影することで、各領域にわたり同様のスリットパターンを観測でき、同様の精度で形状を算出することが可能になる。

【0045】請求項10記載の発明の作用を説明する。物体表面上の凹凸部の段差が大きくなると、プロジェクタの投影レンズの焦点と観測するカメラのレンズの焦点とが合わなくなる。そこで、凹凸部のエッジの位置及び高さや物体の輪郭位置及び高さから、物体表面を同一

の高さを持つ領域ごとに分割する。そして、電気的な制御機構を持つレンズをプロジェクタ及びカメラに装着し、各領域の高さに基づいてCPUによりレンズの焦点を調整する。これにより、物体の三次元形状を一層高精度に算出することができる。

【0046】請求項11記載の発明の作用を説明する。物体表面に汚れや小径の孔、模様や塗装がある部分では、投影されたパターン光が正確に観測されない。これらの部分を、他の正常に観測される部分と同様に扱って形状を算出すると、その部分ばかりでなく、それ以後に接続した位相も不確実なものとなる。

【0047】従って、汚れや小径の孔などがある物体表面の部分も正確に検出するために、プロジェクタからパターン光を投影せずに観測した無投影状態の画像を得る。この画像には、完全な暗室状態でない限り、電灯などの外部照明光が当たった物体が観測される。また、物体に通常の照明と同様のパターン光を投影した全照明状態の画像も得る。

【0048】そして、これらの画像間の各画素における輝度差を算出する。この差が微小であると、パターン光を投影した場合でも、その画素ではパターンの変化を観測することはできない。このような部分を予め検出しておき、その部分での形状の算出結果を排除して形状不定と判定すると共に、形状を正常に算出可能である部分からのデータのみを用いて物体の三次元形状を算出する。

【0049】請求項12記載の発明の作用を説明する。物体表面にある汚れ等により、投影したパターン光が観測されない領域として検出された原因が、照度不足に起因する場合がある。そこで、この発明では電気的に制御可能な絞りを持つレンズをプロジェクタ及びカメラに装着しておき、前回の計測時よりも照度値（輝度値）を上げる方向に絞りを調整する。ここで更に輝度差を算出し、小径の孔のような照度とは関係なくパターンが観測できない領域と、照度を上げることによって観測が可能になる領域とに分離する。照度を上げて観測した画像から、1回目では不定となった領域の形状を算出し、結果を統合することで一層正確な形状を得ることができる。

【0050】請求項13記載の発明の作用を説明する。計測対象である物体の材質が金属のように光沢がある材質の場合には、プロジェクタから投影されたパターン光が乱反射を引き起こす。正常にパターンが観測される部分と同様にこの反射部分の形状を算出すると、不正確な形状となる。そこで、本発明ではこれらの反射を起こす部分（輝度値が飽和している部分）を予め検出する。そして、通常の照明と同様のパターンを投影し、全照明状態の画像を得る。この画像から、輝度値が飽和している領域を検出し、パターンを投影して形状を算出する際に輝度値が飽和している領域からの情報を削除することで、正確な形状を算出することが可能となる。

【0051】請求項14記載の発明の作用を説明する。

10

20

30

40

50

乱反射が発生する領域は、実際に反射を起こしている部分よりも広い範囲で輝度値が飽和してしまう。そこで本発明では、電氣的に制御可能な絞りを持つレンズをプロジェクタ及びカメラに装着しておき、前回よりも照度（輝度値）を下げる方向に絞りを調整する。ここで更に輝度差が飽和している領域を限定し、照度を下げることによって観測が可能になる領域と分離する。照度を下げて観測した画像から、1回目では不定となった領域の形状を算出し、結果を統合することで一層正確な形状を得ることができる。

【0052】

【発明の実施の形態】以下、図に沿って各発明の実施の形態を説明する。図1は本発明の実施の形態を示すブロック図であり、この図を参照しながら請求項1記載の発明の実施の形態を述べる。まず、101は基準面であり、その上には三次元形状の計測対象である物体102が置かれている。この物体102の真上に観測用のカラーカメラ103が設置され、斜め上方にはパターン光の投影用プロジェクタ104が設置される。このプロジェクタ104は、スライドプロジェクタと同様に光源及び

投影レンズを備え、内蔵されたカラー液晶パネル上に任意の色と強度を持つパターンを表示し、そのパターンに基づくパターン光を物体102に投影可能である。

【0053】物体102に投影するスリットパターンデータは、CPU109により、パターンメモリ107にRGBの3フレーム分、作成される。このうち一つのフレームは1画素8ビットで構成され、図2(a)のように明るい帯201と暗い帯202とが一定間隔で交互に並ぶようなスリットパターンが構成される。図2(a)においてy座標がjであるライン203のx座標のデータを図2(b)に示す。このライン203上でのx座標のデータg(x)を、数式2により作成する。

【0054】

【数2】

$$g(x) = 128 \times \sin(x/a \cdot \pi) + 127$$

【0055】ここで、 $0 \leq g(x) \leq 255$ の範囲とし、スリットパターンの周期はaで定まる。aは1以上の数とし、大きい場合には周波数の低い正弦波パターンが、また、小さい場合には周波数の高い正弦波パターンが作成される。

【0056】パターンメモリ107のRGBの3フレームにそれぞれ周波数が異なる同様のパターンを作成すると、これらの3フレームの各ライン203におけるx座標のデータ301、302、303は図3のようになる。ここでは、データ301に対して、302は1/2倍、303は1/3倍の周波数成分を持っている。これらの3フレームはカラーのRGBに対応しており、データ301、302、303の合成データは図4のようになる。

【0057】図4において、RGBすべてのフレームの

合成データの値が最大になる点では、パターン光が白色として物体に投影される。逆に、図4の点304のようにRGBすべてのフレームのデータ301、302、303が0であれば、その点においてパターン光が黒色として物体に投影される。このようなパターンメモリ107のRGBの3フレーム分のデータ301、302、303をパターンデータとして、図1の投影プロジェクタ104のカラー液晶パネルに転送し、プロジェクタ104に内蔵された光源により、投影レンズを介して物体102の表面にカラーのパターン光を投影する。

【0058】物体102に投影されたパターン光はカラーカメラ103により撮像され、その画像はA/D変換部105によりデジタル画像データに変換される。このデジタル画像データはフレームメモリ106に格納される。この画像は、物体102の三次元形状によって変形を受けた変形格子画像となる。カラーの変形格子画像は、撮像と同時にフレームメモリ106のRGBフレームに格納されるため、投影パターンをRGBに各1パターンずつ作成しておけば、フレームメモリ106のRGBフレームには投影した周波数ごとの変形格子画像として格納されることになる。すなわち、撮像と同時に色成分への分離が実行される。

【0059】このように投影したパターンが3パターンであれば、RGBを用いることで撮像と同時に色分離が可能であるが、4つ以上のパターンを合成して投影する場合には、色相を各パターンに与える。合成する場合には、色相情報をRGBに変換した後で合成し、パターンメモリ107に格納することになる。この際、各パターンに与える色相は、互いに排他的になるようにする。

【0060】すなわち、このパターンを撮像して色分離する場合には、RGBから色相に変換することになるので、そのときどのパターンであったかを分離するためには、RGBの組合せ的に排他的である必要がある。このように合成されたパターンの投影を行った場合、色分離した画像は作業領域としてのメモリ108に格納される。なお、図1において、110はD/A変換部、111はディスプレイである。

【0061】図5は、色分離されたパターンのうち、高い周波数成分のパターンによる変形格子画像の一つのラインでの輝度値を示している。このラインでの物体501表面の立上り部分502は、本来2周期分のパターンが投影されるが、カメラ103からの観測画像503における立上り部分502に対応する部分504ではパターンが密集しているため、2周期分として観測することができない。

【0062】例えば、形状計測手法として位相変調量を求める方式では、立上り部分502の形状は図6の601のようになり、本来の形状である602とは異なった形状が算出されてしまう。一方、同一のラインに対して、低い周波数成分のパターン投影による変形格子画像

からは、図7における701のように立上り部分502における抜けは生じない。しかし、低い周波数成分のパターン投影では周期ピッチが長くなるため正弦波パターンからの誤差が大きくなり、全体的な形状は把握できるが形状の計測精度が部分的に劣化する。

【0063】従って、異なる周波数成分のパターン光を投影することにより、大局的な形状から精密な形状を段階的に算出して形状を補正し、図6、図7の本来の形状602を算出することとした。具体的には、低い周波数成分のパターン光からマクロ的な形状を算出しておき、高い周波数成分のパターン光を用いてマクロ的な形状情報の欠落部分を補正するものである。これにより、図5の立上り部分502が補正され、図6、図7に示した本来の形状602が算出される。なお、形状を算出する方式は、フーリエ変換法でも、電子モアレ法でも、縞走査モアレ法でも良い。

【0064】次に、請求項2記載の発明の実施の形態を説明する。ここでは、投影パターンデータとして、一つのライン上のx座標データ $g(x)$ が図8に示すような合成パターンデータを作成する。図8におけるデータ1001に対し、1002では $\pi/2$ 、1003では π 、1004では $3\pi/2$ の位相差を持ち、これらは同一の周波数を有する。これらのデータに特定の色相を与えて合成し、RGBに変換してパターンメモリ107に格納する。

【0065】プロジェクタ104により、上記合成パターンデータに基づくパターン光を投影し、カラーカメラ103により観測されたRGBの変形格子画像を、パターンを作成した際の色相ごとに分離し、メモリ108に格納する。これらの変形格子画像間の各画素において位相変調量を算出し、物体の三次元形状を算出する。

【0066】図9及び図10は、請求項3記載の発明の実施の形態を示している。この実施の形態は、物体を多方向から観測できるように、物体を中心として複数台のカラーカメラを放射状に配置したものである。図9に示すように、カラーカメラ103の両側にカラーカメラ1201、1202を配置し、各カメラ103、1201、1202の光軸が基準面101上で一致するようにする。ここで、物体1203の両端部の領域1204、1205の形状は、中央のカラーカメラ103では観測することができない。

【0067】従って、物体1203にパターン光を投影して各カメラ103、1201、1202からの観測画像により形状を算出し、中央のカラーカメラ103では観測できない1204、1205等の領域を両側のカラーカメラ1201、1202による観測画像によって補なえば良い。なお、カラーカメラの台数は3台以外の複数台でも良い。

【0068】物体1203の撮像に当たっては、図10(a)に示すごとく、各カメラ103、1201、……

に独立したA/D変換器105、105A、……とフレームメモリ106、106A……とを設け、画像入力を並列的に実行するか、図10(b)に示すごとく、A/D変換器105及びフレームメモリ106を図1と同様に1系統とし、カラーカメラ103、1201、……とA/D変換器105との間に設けられた切換器1301をCPU109により制御して画像を順次入力すれば良い。

【0069】図11は、請求項4記載の発明の実施の形態であり、計測対象となる物体1403の平面形状が大きい場合の観測部の構成を示している。解像度を一定に保つために、複数台のカラーカメラ103、1401、1402を同一の高さで物体1403の上方に並設し、計測領域を複数に分割して観測する。この場合も、カラーカメラの台数は3台以外の複数台であれば良い。計測領域は、互いに重なり合う領域が発生するように、物体1403の高さや平面形状に応じて決定する。カメラ103、1401、1402からの入力系は、図10に示した如く並列入力でも逐次入力でも良い。各カメラ103、1401、1402による観測画像に基づき、物体1403の各撮像領域における形状を算出してその結果を合成し、物体全体の三次元形状を計測する。

【0070】図12は請求項5記載の発明の実施の形態であり、物体1502を複数台のプロジェクタにより異なる方向から投影する場合のものである。図12において、カラーカメラ103を挟んで第1のプロジェクタ104と第2のプロジェクタ1501とを物体1502に對し放射状に配置する。カラーカメラ103、プロジェクタ104、1501の光軸は基準面101上で一致している。ここで、プロジェクタは2台以外の複数台でも良い。

【0071】第1のプロジェクタ104により投影されるパターン光では、物体1502の領域1503は物体1502自身により遮蔽されてしまうので、パターン光が領域1503の表面に投影されない。このような領域1503については、第2のプロジェクタ1501からパターン光を投影してカラーカメラ103により観測する。

【0072】プロジェクタ104、1501からの投影に当たっては、図13(a)のように第2のプロジェクタ1501用に独立したパターンメモリ1601を設ける。そして、第2のプロジェクタ1501用に第1のプロジェクタ104とは異なる色成分を持つパターンを作成してパターンメモリ1601に格納し、パターンメモリ107、1601のパターンデータを用いてプロジェクタ104、1501により同時に投影し、カラーカメラ103により変形格子画像を観測して色成分を分離する。

【0073】または、図13(b)のようにプロジェクタ104、1501と単一のパターンメモリ107との

間に切換器1602を設け、プロジェクタ104によるパターン光とプロジェクタ1501によるパターン光とを切り換えて順次観測しても良い。このようにして並列入力または逐次入力された各画像から物体1502の各部の形状を算出し、その後合成することで、物体全体の三次元形状を計測することが可能になる。

【0074】図14は請求項6記載の発明の実施の形態であり、計測対象である物体1701の平面形状が大きい場合のものである。この実施の形態では、物体1701に対し並置された第1のプロジェクタ1702及び第2のプロジェクタ1703により、物体1701に対するパターン光の投影領域を分割して異なる方向からそれぞれパターン光を投影する。なお、プロジェクタの台数は2台以外の複数台でも良い。

【0075】投影領域は、互いに重なり合う領域1704が発生するように、対象となる物体1701の高さや平面形状を考慮して決定する。各プロジェクタからの投影は、図13のように同時投影でも逐次投影でも良い。各プロジェクタ1702、1703から投影されたパターン光をカラーカメラ103により観測し、得られた画像から物体1701の各領域での形状を算出してその結果を合成し、物体全体の三次元形状を計測する。

【0076】この実施の形態において、図9や図11のようにカラーカメラを複数台配置しても良い。その場合には、各カメラにより観測した形状データを合成すれば、物体1701またはカメラを移動させることなく1回の撮像で物体1701の全体形状を計測することが可能になる。

【0077】図15は請求項7記載の発明の実施の形態を示している。この実施の形態は、物体の輪郭が基準面から徐々に変化するものではなく、基準面から急峻に立ち上がるような形状を持つ場合であっても、これを正確に計測するためのものである。図15において、基準面101上の物体1801の形状を計測する場合に、第1のプロジェクタ104からの投影パターン光をRGBすべて最大輝度、すなわち合成されたパターン光が白色で無地になるようにして投影すると、基準面101と物体1801との段差により陰影部分1802が発生する。この陰影部分1802は、物体1801の輪郭位置の高さ1803とプロジェクタ104の位置及びパターン光の投影角度に依存する。

【0078】この状態をカラーカメラ103により観測し、画像を取り込む。そして、既知である光学系の配置（プロジェクタ104の位置及び投影角度）から、物体1801の輪郭位置及び高さ1803を算出する。また、カラーカメラ103を介して第1のプロジェクタ104の反対側に第2のプロジェクタ1804を配置すれば、物体1801の反対側の輪郭位置及び高さ1805が算出される。同様に、複数台のプロジェクタを配置することにより、物体全体の輪郭位置及び高さを得ること

ができる。

【0079】次に、スリットパターンデータを合成してなるパターン光を投影してカラーカメラ103により観測する。取り込んだ画像に対し、検出した物体1801の輪郭位置から物体1801の存在する領域についてのみ形状を算出する。これにより算出される形状は、図16(a)に示すように物体表面での相対的な値となるので、このデータに対し、先に検出した輪郭位置の高さである図16(b)のデータを加味することにより、図16(c)に示す最終的な形状データを得る。これにより、基準面から急峻に立ち上がるような形状を持つ物体1801についても、三次元形状を正確に検出することができる。

【0080】図17は請求項8記載の発明の実施の形態を示している。この実施の形態は、表面に段差を有する物体の形状を正確に計測するためのものである。図17のように、物体2001の表面に段差2002が存在する場合、第1のプロジェクタ104から前述のごとく白色かつ無地のパターン光を投影すると、上記段差2002により陰影部分2003が発生する。この状態をカラーカメラ103により観測して画像を取り込むと、既知である光学系の配置から段差2002のエッジ位置及び高さ2004を算出することができる。

【0081】陰影部分2003は、プロジェクタ104からの投影により発生するが、反対側に設けられた第2のプロジェクタ2005から白色かつ無地のパターン光を投影すれば、陰影部分2003は観測されなくなる。このことから、段差2002の左側が高く、右側が低いことがわかる。このように、複数台のプロジェクタにより多方向からパターン光を投影して観測した画像間の演算を行うと、段差2002のエッジ位置の両側における物体表面の高低を検出することができる。

【0082】次に、プロジェクタ104、2005からスリットパターンデータを合成してなるパターン光を投影し、カラーカメラ103により観測する。カメラ103に取り込んだ画像から形状を算出し、検出した物体2001の陰影部分2003については、先に検出した情報により陰影部分2003の観測が可能である方向のプロジェクタ104による投影パターンから形状を算出し、その算出結果により全体形状を補正して物体の三次元形状を決定する。

【0083】図18は請求項9記載の発明の実施の形態を示している。この実施の形態は、表面に凹凸状の段差を有する物体の形状を正確に計測するためのものである。図18のように表面に段差を持つ物体2101に対して、図15、図17と同様に物体2102の輪郭と表面上の段差による、エッジ位置及び高さを検出する。これらの情報に基づき、同一の高さを持つ輪郭及びエッジによって、図19に示すように物体2102の平面形状を複数の領域2201、2202、2203に分割す

る。

【0084】ここで、単一周波数のパターン光を物体2102に投影すると、図20に示すように領域2202上でのパターンピッチは2301となり、領域2201上でのパターンピッチは2302となる。この周波数が領域2202にとって適切である場合、この領域2202よりも高い領域2201ではパターンピッチが狭くなる。よって、領域2201内で形状が変化している場合にはピッチが更に密集し、周期パターンとして観測できなくなる。

【0085】そのような場合には、領域ごとの平均的な高さをエッジから算出し、その高さに応じた低い周波数成分を持つパターン光を領域ごとに投影する。投影されたパターン光により領域ごとに形状を算出して合成することにより、物体全体の三次元形状を算出する。また、逆に高さが低い領域では、投影パターン光の周波数を高くすればよい。

【0086】次に、請求項10記載の発明の実施の形態を説明する。物体表面における高低差や基準面との高低差が増大すると、物体の高さによって投影レンズを通して結像するパターンが量けてしまい、また、カメラによる撮像でも量けが発生する。図21に示す構成において、図18に示したような段差を持つ物体2101に対し図19と同様に領域分割を行う。分割された各領域に対して、その領域のエッジの平均高さを算出し、CPU109により焦点の調整量を決定するか、または、高さによる焦点の調整量を予めテーブルデータとしてメモリ108に保存しておく。

【0087】図21において、上述のように決定した調整量は、焦点を制御するためのインターフェース2405に転送し、カメラ103及びプロジェクタ104、2401のレンズ2402、2403、2404の焦点調整用の駆動系を制御して焦点を調整する。また、要求される精度により、焦点を調整して形状を算出する領域の分割数を決定する。

【0088】図19のように物体の平面形状で分割された領域が2201、2202、2203であるとき、これらの各領域をすべて同じ領域として扱い、初期状態として設定されている焦点で1回の撮像により物体形状を算出する。この状態よりも更に高精度を得たい場合には、領域2202と2203とは比較的近い高さであることから同一領域として扱い、1回の焦点調整と2回のパターン観測とにより物体形状を算出する。同様に、領域2201～2203すべてを高さが異なる個別の領域として扱い、2回の焦点調整と3回のパターン観測とにより物体形状を算出する。これらの焦点調整及びパターン観測の回数は、形状計測処理に与えられる時間と検出精度とにより任意に選択可能である。

【0089】次に、請求項11記載の発明の実施の形態を説明する。図22(a)に示すように、物体表面の1

本のライン2501上に汚れ2502及び小径の孔2503がある場合を考える。この表面にパターン光を投影すると、汚れ2502及び孔2503に対応する輝度値は、それぞれ図22(b)における領域2504、2505のようになる。

【0090】このようなパターンから形状を算出すると、領域2504、2505の部分で形状が不定となり、そのまま接続すると全体の形状が正確に得られない。従って、まず、どのプロジェクタからもパターン光を投影しない無投影状態で観測する。このときのライン2501の輝度値は、図23(a)における2601となり、白色かつ無地のパターン光を各プロジェクタから投影した場合の輝度値は2602となる。このとき、汚れ2502及び孔2503に対応する領域2603、2604では、輝度値2602と2601との差が少なくなる。

【0091】すなわち、領域2603、2604では、実際にパターン光を投影してもパターンとしては観測できないことになる。また、領域2603、2604はどの方向からの投影でも発生すること等から、これらの領域2603、2604は段差によるものではないことがわかる。

【0092】スリットパターンデータに基づくパターン光を投影した場合の輝度値は、図23(b)の2605となる。輝度値を周波数領域で解析する場合、領域2609、2610(図23(a)の領域2603、2604)はノイズ成分的なデータとなるため、輝度値2605のデータから領域2609、2610のデータを削除する。従って、分断された図23(b)の領域2606、2607、2608内で、個々に形状を算出する。

【0093】最終的な物体の三次元形状を決定する際、例えば、物体の表面が基本的に平面であるという知識があるならば、領域2606、2607、2608をそのまま接続し、領域2609、2610の部分の形状を不定としたまま最終結果とする。最終結果として上述のように一部を形状不定としない場合には、削除した部分(領域2609、2610)は直線にて接続する等の補正の手段を予め定めておき、補正処理を行う。

【0094】また、最終的な形状を決定する際の前提となる知識がない場合には、前述した汚れ2502や孔2503の幅よりも十分に長い周期を持つパターン光を投影し、図24における2701～2704の位置を得ることで相対的な領域2606、2607、2608から算出された形状を接続し、物体の全体形状を決定することも可能である。なお、この実施の形態は、物体表面に模様や塗装が施されている場合にも同様に適用可能である。

【0095】次いで、請求項12記載の発明の実施の形態を説明する。この実施の形態では、図22に示したように物体表面の汚れや小さい孔、模様などにより形状が

不定となる領域に対して、前回の形状計測時よりも輝度値を増加させる。すなわち、図21に示したインターフェース2405によりレンズ2402～2404の絞りを調整し、投影するパターン光とカメラ103への入射光量を増加させる。

【0096】ここで、どのプロジェクタからもパターン光を投影しない無投影状態の輝度値と、白色で無地のパターン光を各プロジェクタから投影した場合の輝度値とは、それぞれ図25の2801、2802となる。図25の領域2804（図22の孔2503による図23の領域2604、2610に対応）では、輝度を増加しても2801、2802の輝度差は微小であり、パターン光を投影しても計測は不能である。一方、領域2803（図22の汚れ2502による図23の領域2603、2609に対応）では2801、2802の輝度差が増加し、この状態でパターン光を投影すれば計測が可能となっている。

【0097】図26は、スリットパターンデータに基づくパターン光を投影したときの輝度値を示している。1回目では計測不能だった図22の汚れ2502の部分でも、図26の領域2901においてパターンが観測され、形状が算出される。この形状を1回目で得られた形状に加味することで、表面に汚れ等がある物体についてもその形状を正確に計測することができる。

【0098】次に、請求項13記載の発明の実施の形態を説明する。この実施の形態は、金属のように光沢のある材質からなり、表面での投影パターン光の反射が強い物体を計測する場合のものである。図27(a)において、表面での反射が強い材料からなる物体3001にパターン光を投影すると、輝度値の変化は図27(b)の3003のようになる。

【0099】この時、プロジェクタ104に正対している傾斜面3002で観測される輝度値は、図27(b)の領域3006における3004となり、高輝度で飽和した状態が連続するのでパターンとしての変化が得られない。従って、3006のような領域を含めたままでは、物体の三次元形状を正確に測定できない。

【0100】そこで、白色で無地のパターン光をプロジェクタ104から投影すると、その輝度値は図28の3101となる。このため、最大輝度値3102との差がある、領域3005と3007のみについてパターン光を投影して物体の三次元形状を算出する。この時、傾斜面3002に対応する領域3006についてはそのまま不定の領域として処理する。

【0101】次いで、請求項14記載の発明の実施の形態を説明する。この実施の形態では、図28における形状不定と判定された領域3006に対して輝度を減少させる。図21におけるインターフェース2405により、レンズ2402～2404の絞りを制御し、投影するパターン光とカメラ103への光量を減少させる。こ

こで、物体3001に対して白色で無地のパターン光をプロジェクタから投影すると、その輝度値は図29の3201となる。前回形状不定と判定された領域3006では最大輝度値3102との輝度差が増加し、パターンとしての変化を得ることができる。

【0102】図30に、この状態でスリットパターンデータに基づくパターン光を投影したときの輝度値の変化を3301として示す。領域3006では輝度値の変化が得られ、この領域での形状を算出することが可能になっている。1回目の計測で算出された形状とここで算出された形状とを統合することで、物体の全体形状を得ることができる。また、輝度を減少させても輝度値が飽和してしまう領域については、形状を算出する際のデータから外し、その領域では形状不定として処理すれば良い。

【0103】

【発明の効果】以上のように請求項1の発明によれば、周波数成分の異なる正弦波状の複数のスリットパターンデータを合成してカラーのパターンデータを作成し、このデータに基づくパターン光を投影して変形格子画像を色成分に分離することにより、1回の観測すなわち1枚の画像から、変化が急峻な物体の三次元形状についても短時間かつ高精度に計測することができる。

【0104】請求項2の発明によれば、同一周波数成分を持ち、位相のずれた正弦波状の複数のスリットパターンデータに基づくパターン光を投影して変形格子画像を色分離することにより、位相のずれた各パターンデータの画像間の各画素における位相変調量が1枚の画像から得られ、物体の三次元形状を短時間かつ高精度に計測することができる。

【0105】請求項3の発明によれば、複数台のカメラにより多方向から物体を観測することで形状を相互に補間し合うことが可能になり、三次元形状を高精度に計測することができる。

【0106】請求項4の発明によれば、複数台のカメラを用いて物体の計測範囲を複数に分割することにより、1台のカメラの視野以上の大きさを持つ物体や球形の物体の形状を計測することができる。

【0107】請求項5の発明によれば、物体に対して複数台のプロジェクタにより多方向からパターン光を投影することにより、物体自体に遮られてパターン光が当たらない領域をなくすと共に、異なる方向からの投影によって欠落のない形状を計測することが可能になる。

【0108】請求項6の発明によれば、複数台のプロジェクタを用いて物体の投影領域を複数に分割することにより、1台のプロジェクタによる投影領域以上の大きさを持つ物体や曲面を有する物体の形状を欠落なく計測することができる。

【0109】請求項7の発明においては、複数台のプロ

ジェクタを用いて基準面と物体との段差による陰影部分

を検出し、この陰影部分における輪郭位置及び高さを検出する。これらの情報に基づき、物体が存在する領域のみについて形状を計測するので、処理時間の短縮が可能になる。また、算出された物体の形状に対して段差量を加味するので、段差部分で投影したパターン光が何周期も観測不能となっても、物体の三次元形状を正確に計測することができる。

【0110】請求項8の発明においては、表面に段差を有する物体の形状計測において、スリットパターンデータによるパターン光を投影する前に、通常の照明と同様のパターン光を複数方向から投影し、パターン光の投影角度から段差のエッジ位置での高さを検出し、パターン光の投影方向からエッジ位置の両側の高低状態を検出する。これにより、表面に段差を有する物体であってもその全体的な形状を正確に計測可能である。

【0111】請求項9の発明においては、予め検出した物体の輪郭位置と高さ、物体表面での段差のエッジ位置と高さを用いて、物体を高さが同一な複数の領域に分割し、これらの領域の高さに応じた周期を持つパターン光を投影することで、どの高さに対しても同様の精度で形状を測定することができる。

【0112】請求項10の発明においては、複数に分割された各領域の高さに応じてカメラ及びプロジェクタのレンズの焦点を調整することにより、より高精度に形状を計測することができる。

【0113】請求項11の発明においては、物体表面の汚れや小さな孔、模様等の情報を予め検出し、その領域については形状不定として判定すると共に、それ以外の領域から得たデータに基づいて物体の三次元形状を測定することができる。

【0114】請求項12の発明においては、観測したパターン光での輝度が小さく、形状不定と判定された領域に対して、カメラ及びプロジェクタのレンズの絞りを調整し、その領域に対してのみ形状を再度計測することにより、形状不定とされる領域を減少させることができる。

【0115】請求項13の発明においては、投影したパターン光が物体表面で反射する輝度値の飽和領域を予め検出し、その領域については形状不定と判定すると共に、それ以外の領域から得たデータに基づいて物体の三次元形状を測定することができる。

【0116】請求項14の発明においては、物体表面での反射により観測したパターン光の輝度が飽和した領域に対してカメラ及びプロジェクタのレンズの絞りを調整し、その領域に対してのみ形状を再度計測することにより、形状不定とされる領域を減少させることが可能になる。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の実施の形態を示すブロック図である。

【図2】スリットパターンと1ライン上のデータの説明

図である。

【図3】RGBの3フレームのデータの説明図である。

【図4】図3の合成データの説明図である。

【図5】高い周波数成分のパターン光による変形格子画像の輝度値を示す図である。

【図6】形状の計測誤差を説明する図である。

【図7】形状の計測誤差を説明する図である。

【図8】合成されたパターンデータの説明図である。

【図9】本発明の実施の形態における観測部の構成図である。

【図10】本発明の実施の形態における主要部のブロック図である。

【図11】本発明の実施の形態における観測部の構成図である。

【図12】本発明の実施の形態における観測部の構成図である。

【図13】本発明の実施の形態における主要部のブロック図である。

【図14】本発明の実施の形態における観測部の構成図である。

【図15】本発明の実施の形態における観測部の構成図である。

【図16】本発明の実施の形態において計測された形状データの説明図である。

【図17】本発明の実施の形態における観測部の構成図である。

【図18】本発明の実施の形態における観測部の構成図である。

【図19】本発明の実施の形態における物体平面形状の分割領域の説明図である。

【図20】本発明の実施の形態におけるパターンピッチの説明図である。

【図21】本発明の実施の形態における観測部の構成図である。

【図22】本発明の実施の形態における物体表面の様子と輝度値の説明図である。

【図23】本発明の実施の形態における輝度値の説明図である。

【図24】本発明の実施の形態における輝度値の説明図である。

【図25】本発明の実施の形態における輝度値の説明図である。

【図26】本発明の実施の形態における輝度値の説明図である。

【図27】本発明の実施の形態における観測状態と輝度値の説明図である。

【図28】本発明の実施の形態における輝度値の説明図である。

【図29】本発明の実施の形態における輝度値の説明図である。

【図30】本発明の実施の形態における輝度値の説明図である。

【符号の説明】

101 基準面

102, 501, 1203, 1403, 1502, 17

01, 1801, 2001, 2101, 3001 物体

103, 1201, 1202, 1401, 1402 カ
ラーカメラ

104, 1501, 1702, 1703, 1804, 2

005, 2102, 2401 プロジェクタ

*105, 105A A/D変換部

106, 106A フレームメモリ

107, 1601 パターンメモリ

108 メモリ

109 CPU

110 D/A変換部

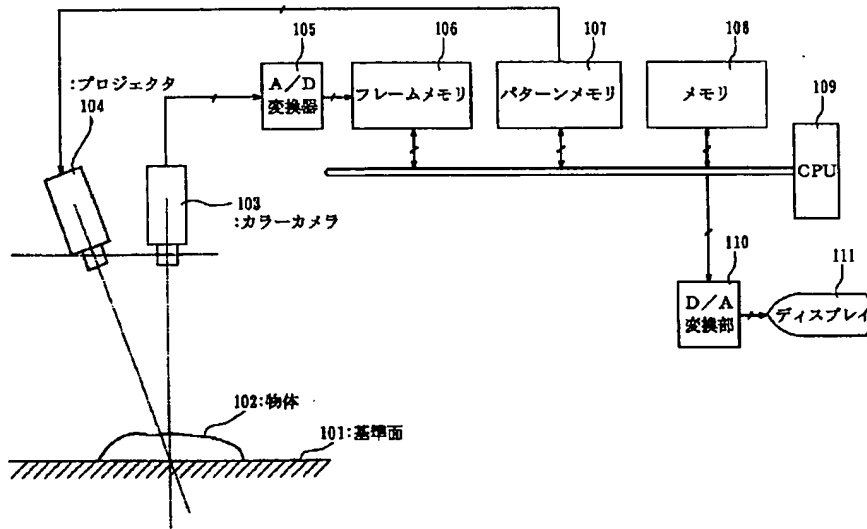
111 ディスプレイ

1301, 1602 切換器

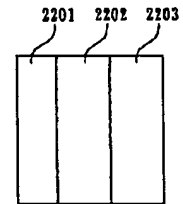
2402, 2403, 2404 レンズ

*10 2405 インターフェース

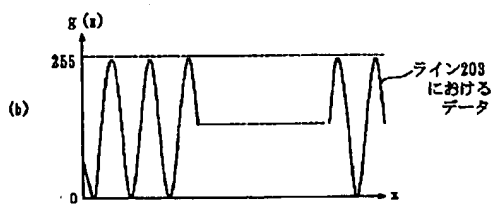
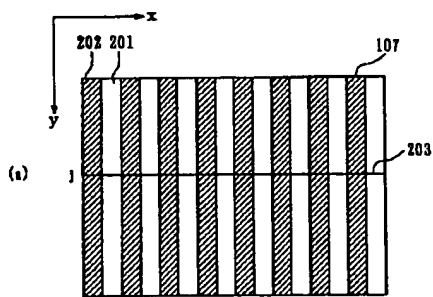
【図1】



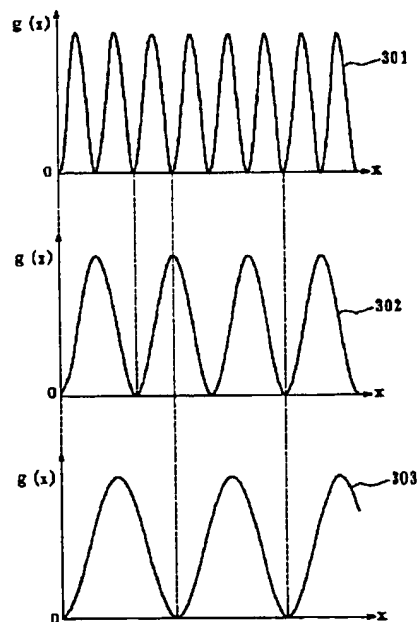
【図19】



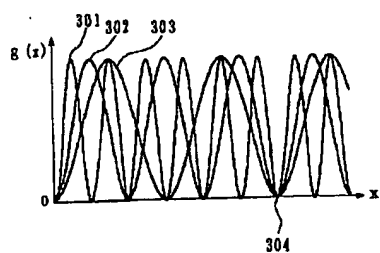
【図2】



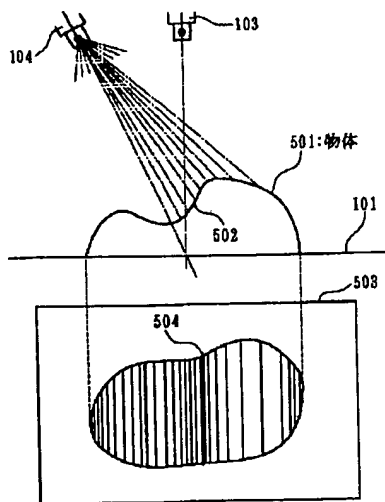
【図3】



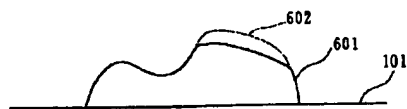
【図4】



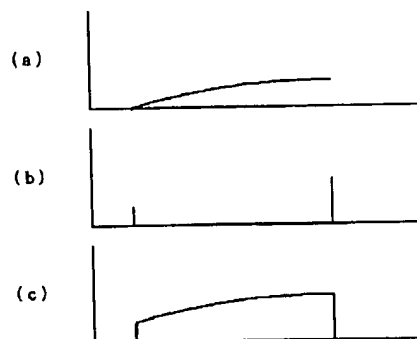
【図5】



【図6】



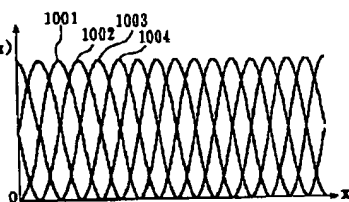
【図16】



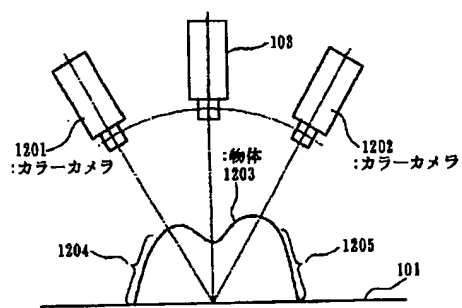
【図7】



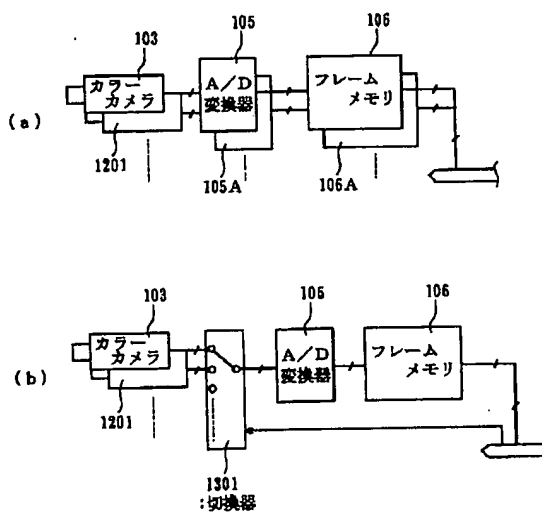
【図8】



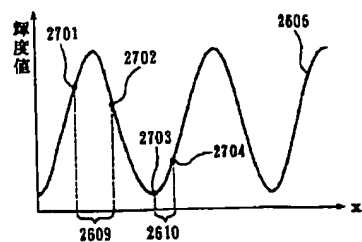
【図9】



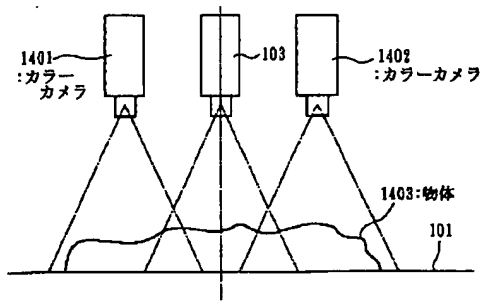
【図10】



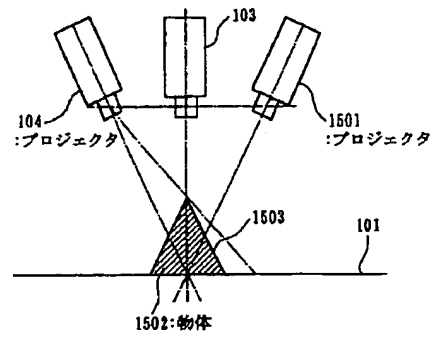
【図24】



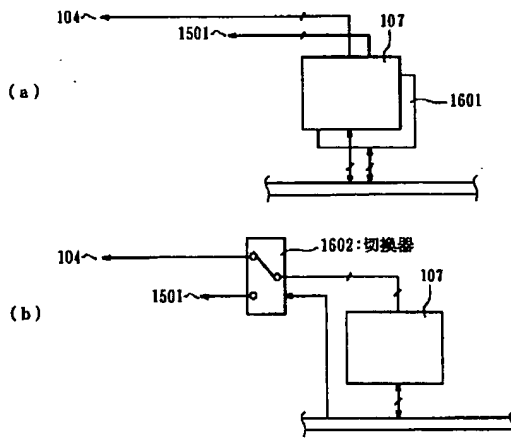
【図11】



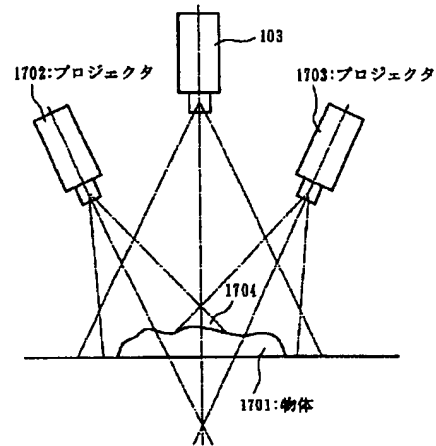
【図12】



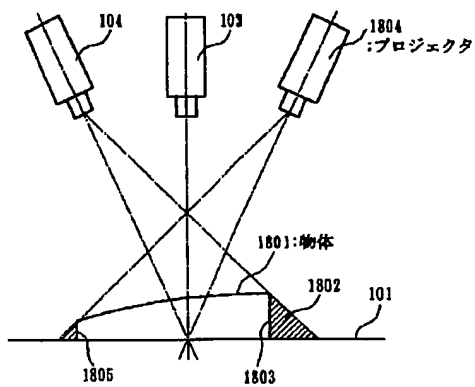
【図13】



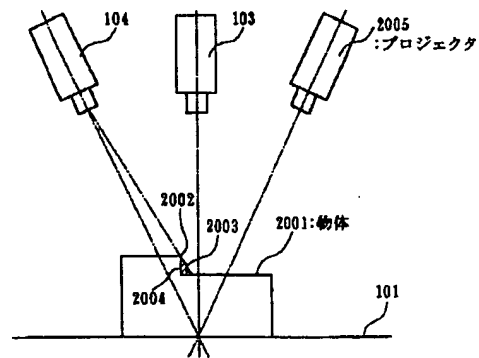
【図14】



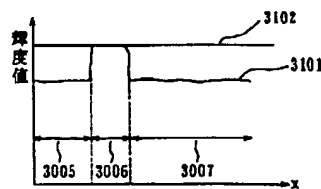
【図15】



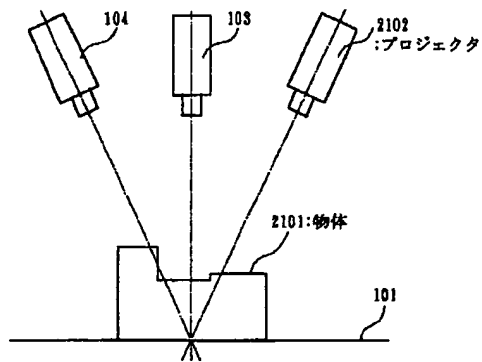
【図17】



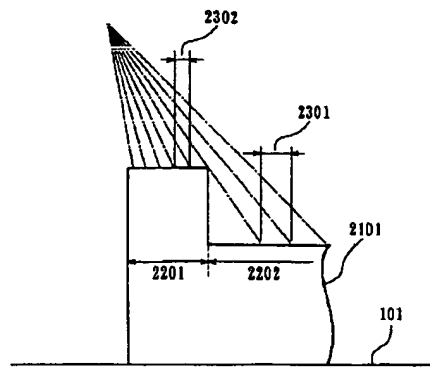
【図28】



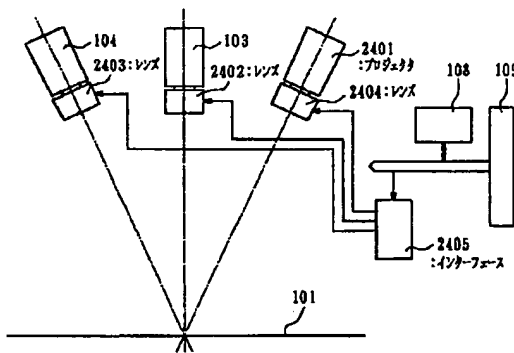
【図18】



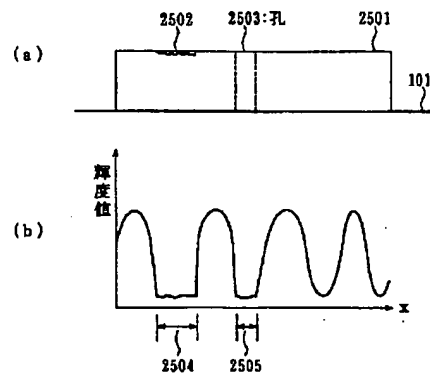
【図20】



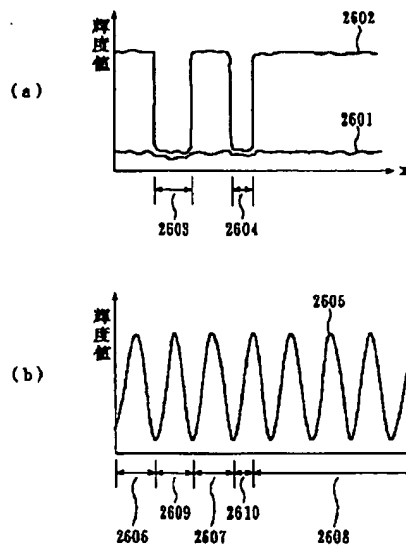
【図21】



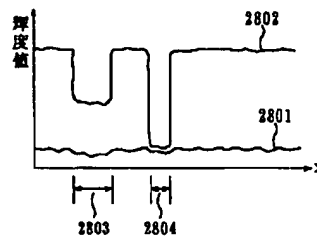
【図22】



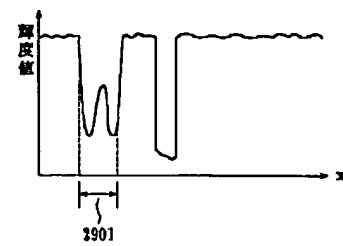
【図23】



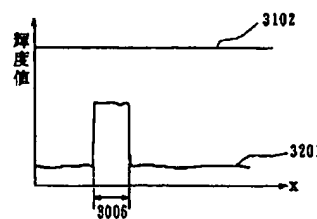
【図25】



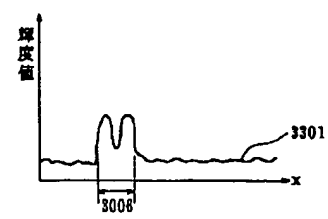
【図26】



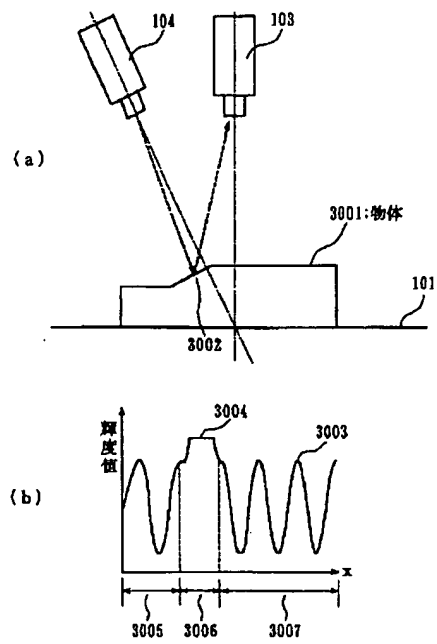
【図29】



【図30】



【図27】



**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning
Operations and is not part of the Official Record**

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☐ **BLACK BORDERS**
- ☐ **IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES**
- ☐ **FADED TEXT OR DRAWING**
- ☐ **BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING**
- ☐ **SKEWED/SLANTED IMAGES**
- ☐ **COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS**
- ☐ **GRAY SCALE DOCUMENTS**
- ☐ **LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT**
- ☐ **REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY**
- ☐ **OTHER:** _____

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.